



(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« » 2019p.

(код і назва спеціальності)

(шифр групи)

(прізвище, імя, по батькові)

(підпис)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

(підпис)

Київ – 2019 р.

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Оптична система є основною складовою сучасного напрямку розвитку фотоніки. Американська Програма розвитку фотоніки зробила прогноз, що ринок фотоніки в США буде подвоюватися кожні чотири роки і досягне в 2013 році 500 мільярдів доларів. Далі він буде подвоюватися вже кожні два роки. До 2015 року ринок фотоніки досягне 1 трлн доларів.

Основним параметром, що характеризує якість оптичної системи згідно стандарту ISO 12233 є оптична передавальна функція та її складові : модуляційна передавальна функція та фазова передавальна функція. Розробка методики визначення цих характеристик та аналіз очікуваної точності їх вимірювання є актуальною задачею

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є порівняльний аналіз існуючих методів контролю якості зображення оптичних систем та оцінка факторів що впливають на точність вимірювання.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- зробити огляд критеріїв якості зображення оптичних систем;
- проаналізувати можливості стендової апаратури для визначення якості оптичного зображення
- визначення похибок сучасних стендів контролю якості зображення та оцінка їх впливу на точність

Об'єкт дослідження. Контроль якості зображення об'єктів

Предмет дослідження. Методи для контролю якості зображення об'єктів

Методи дослідження. У роботі використовувались аналітичні співвідношення що характеризують якість зображення об'єктів. Зокрема Фур'є перетворення для обчислювання складових оптичної передавальної функції (ОПФ). Визначення раціональних параметрів стендової апаратури вимірювання ОПФ проводилось за результатами математичного моделювання. Оцінка

точносних параметрів стендової апаратури була виконана з урахуванням положень теорії точності.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропонована методика математичного моделювання для визначення раціональних параметрів вузлів стендової апаратури для вимірювання складових ОПФ з похибкою, що не перевищує 5%. Проаналізовано вплив конструктивних параметрів стендової апаратури на результати вимірювання ОПФ з необхідною точністю. Розроблено стартап-проект по результатах досліджень.

Публікації: 1. Киричук Б.В. Числові критерії оцінки якості зображення. Збірник праць науково-практичної конференції «Погляд у майбутнє приладобудування» Київ, Приладобудівний факультет, 2018р.

2. Кучеренко О.К., Киричук Б.В. Визначення параметрів щілинної діафрагми в стенді для вимірювання оптичної передавальної функції об'єктива. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №2. 2019р.

3. Кучеренко О.К., Киричук Б.В. Визначення вимог до позиціонування інфрачервоних об'єктів при вимірюванні модуляційної передавальної функції. Прийнята до друку і буде надрукована в науковому журналі «Вісник Хмельницького національного університету» № 6 за 2019 р. серії «Технічні Науки».

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 90 сторінок, з обсягом основного тексту 89 сторінок. Дисертація містить 32 рисунки, 24 таблиці, список використаних джерел із 24 найменувань на 3 сторінках.

Ключові слова: оптична передавальна функція, модуляційна передавальна функція, фазова передавальна функція, лінійний прилад з переносом заряду, мікроболометрична камера, функція розсіювання лінії, щілинна діафрагма, точність вимірювання

ABSTRACT

Actuality of theme. The optical system is the main component of the modern direction of photonics development. The US Photonics Development Program has forecast that the US photonics market will double every four years and reach \$ 500 billion in 2013. Then it will double every two years. By 2015, the photonics market will reach \$ 1 trillion.

The main parameter characterizing the quality of the optical system according to ISO 12233 is the optical transfer function and its components: modulation transfer function and phase transfer function. Developing a methodology for determining these characteristics and analyzing the expected accuracy of their measurement is an urgent task.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the work is to compare the existing methods of quality control of the image of optical systems and to evaluate the factors that affect the measurement accuracy.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- review the image quality criteria of optical systems;
- to analyze the capabilities of bench equipment for determining the quality of the optical image
- determination of errors of modern stands of the image quality control and estimation of their influence on accuracy

Object of study. Lens image quality control

Subject of study. Techniques for controlling the quality of lenses

Research methods. Analytical ratios were used to characterize the image quality of the lenses. In particular, the Fourier transform for the calculation of the components of the optical transfer function (OPF). The determination of the rational parameters of bench equipment measuring OPF was carried out according to the results of mathematical modeling. The evaluation of the precision parameters of the bench equipment was made taking into account the provisions of the theory of accuracy.

Scientific novelty of the obtained results. A mathematical modeling technique is proposed for determining the rational parameters of the bench units for measuring the components of the OPF with an error not exceeding 5%. The influence of the design parameters of the bench equipment on the results of measuring the OPF with the required accuracy is analyzed. A startup project based on research results has been developed.

Publications.

1. Kyrychuk BV Numerical image quality evaluation criteria. Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Looking into the future of instrument making" Kyiv, Faculty of Instrument Engineering, 2018.

2. OK Kucherenko, BV Kyrychuk Determination of the aperture parameters in the stand for measuring the optical transmission function of the lens. "Measuring and computing technology in technological processes" . №2. 2019

3. OK Kucherenko, BV Kyrychuk Determination of infrared lens positioning requirements when measuring modulation transfer function. Bulletin of Khmelnytsky National University. №6. 2019.

Structure and scope of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used. The total volume of work is 89 pages, with the main text of 83 pages. The dissertation contains 32 drawings, 24 tables, a list of used sources of 24 titles on 3 pages.

Keywords: optical transfer function, modular transfer function, phase transfer function, linear time-transfer device, microbolometer camera, value expansion function, rather large aperture, accuracy of use.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
Розділ 1. Критерії якості оптичного зображення.....	9
1.1 Характеристики якості зображення	9
1.2 Числові критерії оцінки якості зображення	19
Висновки до першого розділу.....	28
Розділ 2. Методи контролю якості зображення	29
2.1. Установки з механічним скануванням в площині зображення.....	29
2.2. Установки з використанням ЛПЗЗ приймачів в площині зображення.....	31
2.3. Установки з використанням мікроболометричних матриць в площині зображення.....	39
Висновки до другого розділу	49
Розділ 3. Похибки конструктивних параметрів стендів вимірювання ОПФ	50
3.1. Вплив параметрів щільної діафрагми на похибку вимірювання ОПФ ..	50
3.2. Визначення вимог до позиціонування інфрачервоних об'єктів при вимірюванні МПФ.....	56
3.3. Оцінка впливу коліматорного об'єктива стенда вимірювання ОПФ на якість зображення.....	63
Висновки до третього розділу.....	68
Розділ 4. Розробка стартап проекту.....	70
4.1 Опис ідеї проекту	71
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	73
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	74
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	81
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	83
Висновки до четвертого до розділу.....	87
ВИСНОВОК.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації.

ОС – оптична система.

ОПФ – оптична передавальна функція.

МПФ – модуляційна передавальна функція.

ФПФ – фазова передавальна функція

ФРТ – функція розсіювання точки.

ФРЛ – функція розсіювання лінії.

ФРК – функція розсіювання краю.

ФПК – функція порогового контрасту.

ЧКХ – частото-контрастна характеристика.

ПЧХ – просторово-частотна характеристика.

КПМ – коефіцієнт передачі модуляції.

ЧФХ – частото-фазова характеристика.

ЛППЗ – лінійний прилад з переносом заряду.

МБК – мікроболометрична камера.

ВСТУП

Оптична система є основною складовою сучасного напрямку розвитку фотоніки. Американська Програма розвитку фотоніки зробила прогноз, що ринок фотоніки в США буде подвоюватися кожні чотири роки і досягне в 2013 році 500 мільярдів доларів. Далі він буде подвоюватися вже кожні два роки. До 2015 року ринок фотоніки досягне 1 трлн доларів. За прогнозами Програми в 2015 році більше 35% всіх випущених споживчих товарів становитимуть прилади та пристрої, створені на основі принципів фотоніки. Ринок оптичних пристроїв зберігання інформації буде зростати на 20% кожні 5 років; Міністерство науки і технологій Південної Кореї на фотоніку щорічно виділяє 30% всього держбюджету, спрямованого на науку.

Основним параметром, що характеризує якість оптичної системи згідно стандарту ISO 12233 є оптична передавальна функція та її складові : модуляційна передавальна функція та фазова передавальна функція. Розробка методики визначення цих характеристик та аналіз очікуваної точності їх вимірювання є актуальною задачею.

Розділ 1. Критерії якості оптичного зображення

1.1 Характеристики якості зображення

Реальна оптична система створює зображення предмета з певним спотворенням. Відмінність зображення від предмета виникає внаслідок аберацій оптичної системи, дифракційних явищ, дефектів виготовлення і інших факторів [1].

Характеристикою якості зображення служать аберації різних видів в залежності від поставленої задачі. Оптичні системи з великими аберациями характеризують, як правило, геометричними аберациями, а для систем з малими аберациями виявляється більш зручним використання хвильових абераций [2, 3].

Геометричною аберацией називається відхилення значень координат променів, розрахованих для реальної системи, від значення координат тих же променів, розрахованих для ідеальної системи. Геометричні аберации ділять на монохроматичні, які виникають при проходженні через систему променів світла однієї довжини хвилі, і хроматичні, що виникають при проходженні через систему променів з різними довжинами хвиль (біле світло)

До монохроматичних абераций відносяться сферична (повздовжня, поперечна), кома, астигматизм, кривизна поля і дисторсія, а до хроматичних – хроматизм положення і хроматизм збільшення [4].

Хвильовою аберацией оптичної системи називається відхилення реального хвильового фронту від поверхні порівняння: сфери для фотографічних об'єктивів, об'єктивів телескопів і інших об'єктивів, площини для телескопічних систем.

Хвильова аберация виражається в одиницях довжини хвилі. Якщо хвильова аберация менша або рівна $0,1\lambda$, то зображення точки вважають ідеальним. Якщо хвильова аберация рівна $0,25\lambda$, то зображення вважають хорошим. Вказані границі були знайдені англійським фізиком Релеєм і отримали назву «критерії Релея».

Аберації вимірюють в реальних оптичних системах для знаходження відповідності їх розрахунковим даним і для встановлення впливу кожної аберації на якість зображення. В залежності від призначення оптичної системи аберації вимірюють в кутовій мірі (для зорових труб и прожекторних дзеркал) або в лінійній мірі (в фотографічній оптиці). Хвильові аберації вимірюють в астрономічній і мікроскопічній оптиці, для спектральних призм і т.п.

Аберації разом з неминучими похибками виготовлення оптичних деталей і збірки оптичних схем знижують якість зображення [4].

Характеристики якості зображення залежать від вимог, що пред'являються до оптичних систем. Оптичні системи астрономічних приладів, телескопічних систем, розраховуються з мінімальними абераціями, і основним обмеженням таких систем є дифракція на вхідній зіниці. Для оцінки якості зображення в таких системах, може бути використана функція розсіювання. Якість зображення оптичних систем, що мають велике кутове поле зору, працюючих з оком, матричним приймачем, телевізійною камерою, краще характеризувати контрастом, різкістю, мірою геометричної подібності. Критерієм якості зображення в цих системах може бути гранична крива. Оптичні системи оптико-електронних приладів, що працюють з одноелементним приймачем, які призначені для передачі світлової енергії на чутливу ділянку приймача променистої енергії, краще характеризувати функцією концентрації енергії.

На основі цього, критерії оцінки якості оптичного зображення для різних систем обирають в залежності від виконуваних задач. Критеріями оцінки якості оптичного зображення, що відповідають перерахованим характеристикам можна віднести : функція розсіювання, погранична крива і оптична передавальна функція. Всі три критерії взаємообернені, взаємопов'язані і взаємозамінні, проте, не однаково зручні для різних оптичних систем [5].

Всі три критерії можна отримати із математичного рівняння процесу утворення оптичною системою зображення, що показує залежність між розподілом освітленості $I(x', y')$, в зображенні і розподілом яскравості $O(x, y)$, в предметі [4, 6].

Функція розсіювання

Функція розсіювання $A(x', y')$ – це розподіл освітленості в зображенні нескінченно віддаленої світної точки, в площині найкращого зображення, що представляє собою дифракційну картину. Математичний вираз функції розсіювання $A(x', y')$ для безабераційної оптичної системи має вигляд [4]:

$$A(x', y') = \left[\frac{2j_1(z_1)}{z_1} \right]^2 \quad (1.1)$$

де $j_1(z_1)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку,

Аргумент:

$$z_1 = \frac{\pi D}{\lambda f' \sigma} \quad (1.2)$$

де D – діаметр вхідної зіниці оптичної системи,

f' – фокусна відстань,

λ – довжина хвилі,

$\sigma = \sqrt{(x^1)^2 + (y')^2}$ – відстань від центра плями розсіювання,

x', y' – координати в площині зображення.

Графічне зображення функції розсіювання показано на рис.1.

В центральному кружку функції розсіювання міститься приблизно 84% світлової потужності всього кола розсіювання. Це коло приймають за зображення точки. Периферійні кільця містять відповідно 16% світлової потужності і являють собою фон зображення [4].

В реальних оптичних системах при наявності залишкових аберацій відбувається перерозподіл світлової енергії між центральним кружком і світлими кільцями. Особливо складною дифракційна картина отримується в зображенні позаосьової точки поля. Саме тому за критерій оцінки якості зображення оптичних систем з невеликим полем зору і для досліджень по центру поля застосовують функцію розсіювання.

Поняття функції розсіювання розповсюджується і на розподілення освітленості в зображенні світної лінії. Функція $A_l(x', y')$, зображена на рис. 2 є розсіюванням лінії, що є результатом інтегрування функції $A(x', y')$ розсіювання точки по деякому напрямку, наприклад y . Тоді:

$$A_l(x') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x', y' - y) dy \quad (1.3)$$

По вигляду функції розсіювання визначають наявність аберцій і дефектів виготовлення і збірки деталей ОС.

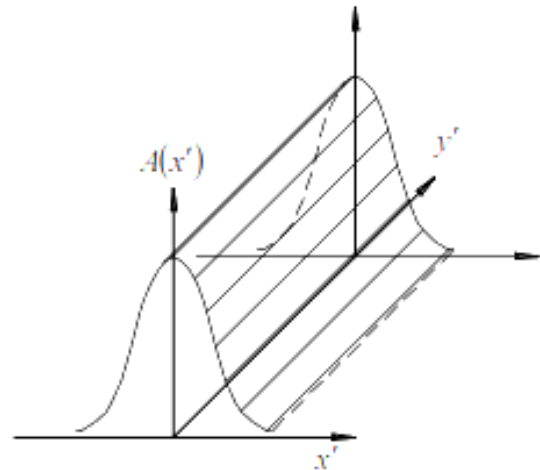
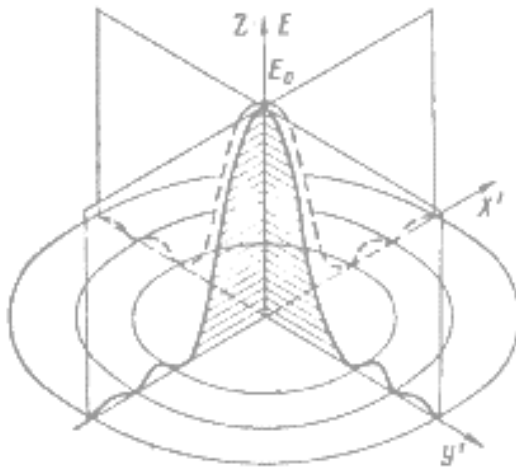


Рис. 1.1. Функція розсіювання точки Рис. 1.2. Функція розсіювання лінії

Для виробничого контролю ОС по функції розсіювання використовують різні числові критерії: розмір центрального кружку плями розсіювання, діаметр плями розсіювання з певним вмістом світлової енергії, кількість якої, встановлюється в залежності від потреб, що пред'являються до ОС, коефіцієнт Штреля – відсоткове відношення освітленості в центрі плями розсіювання даної системи до освітленості в центрі плями розсіювання ідеальної ОС із тими ж параметрами [4, 5].

Гранична крива

Крива розподілу освітленості в зображенні граничного теста $E_{\Pi}(x')$ називається граничною кривою. Ця крива характеризує розподіл освітленості в зображенні об'єкта, що представляє собою границю світлого і темного поля. Такий об'єкт називають пограничним тестом. Розподіл яскравості $L_n(x)$ в ньому описується функцією скачку (рис. 3), яка є одномірною функцією. Для контрасту рівного одиниці [4]:

$$L_n(x) = \begin{cases} L_{\max} = 1 & \text{при } x \leq x_0 \\ L_{\max} = 0 & \text{при } x > x_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Математичний вираз граничної кривої :

$$E_{\Pi}(x^1) = \int_{-\infty}^{\infty} A_{\Pi}(x' - x) dx \quad (1.5)$$

Зв'язок між пограничною кривою $E_{\Pi}(x')$ і функцією розсіювання лінії $A_{\Pi}(x')$ можна знайти із співвідношення :

$$A_{\Pi}(x') = \frac{dE_{\Pi}(x')}{dx'} \quad (1.6)$$

Графічне зображення граничної кривої представлено на рис. 4 :

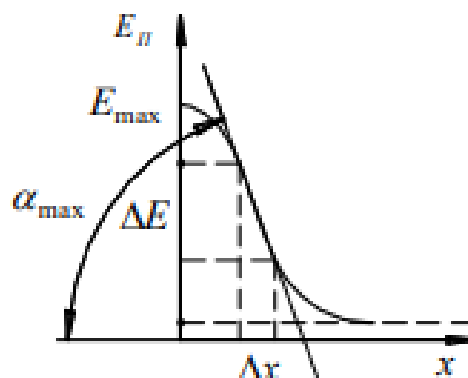
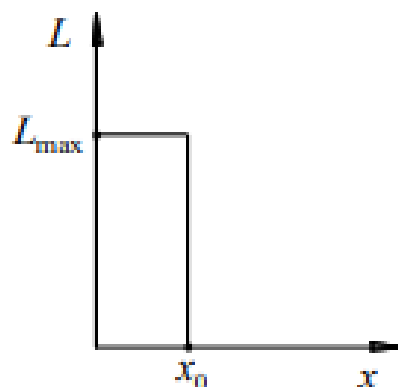


Рис. 1.3 Розподіл яскравості в тесті

Рис. 1.4 Гранична крива

Графік граничної кривої наглядно демонструє про зниження різкості зображення, що є одним із основних параметрів якості візуального зображення. Нахил кривої залежить від розміру плями розсіювання. Чим менший нахил кривої, тим більший розмір плями розсіювання і тим гірша різкість зображення. Звідси випливає, що кут нахилу пограничної кривої характеризує якість зображення по різкості. Граничну криву як критерій якості зображення використовують для систем, що створюють візуальне зображення з великим полем. Крім того, її можна застосувати для безпосередньої оцінки якості зображення складних систем, що складаються з об'єктива і різноманітних приймачів. Наприклад, кінофотоприлади можна перевірити за допомогою фотографічної пограничної кривої, тобто отримати залежність густини D почорніння світлочутливого шару від координат x'' в площині фотоплівки.

Об'єктивно якість зображення кількісно можна оцінити по граничній кривій за допомогою числових критеріїв [4].

Гранична крива в порівнянні з функцією розсіювання більш зручна для оцінки якості зображення при випробуванні ОС з великим полем зору, проте менш зручна для оцінки якості зображення при розрахунках.

Оптична передавальна функція

Останнім часом як основний критерій оцінки якості складних ОС (також і об'єктів з великим полем зору), призначених для передачі інформації, широке застосування отримала ОПФ. Вона слугує мірою можливості ОС відтворювати різні просторові частоти [7]. Будь який предмет, створений ОС, можливо описати функцією розподілу яскравості $L(x, y)$, і цю функцію, згідно перетворення Фур'є, можливо розкласти на окремі синусоїдальні складові з змінними просторовими частотами, що характеризуються амплітудою (інтенсивністю світла), і фазою (кутовою орієнтацією на площині), що залежать від просторової частоти. Наприклад, функцію розподілу яскравості в прямокутній решітці (рис. 5) можливо представити набором синусоїд 1 – 4 з різними амплітудами і періодами.

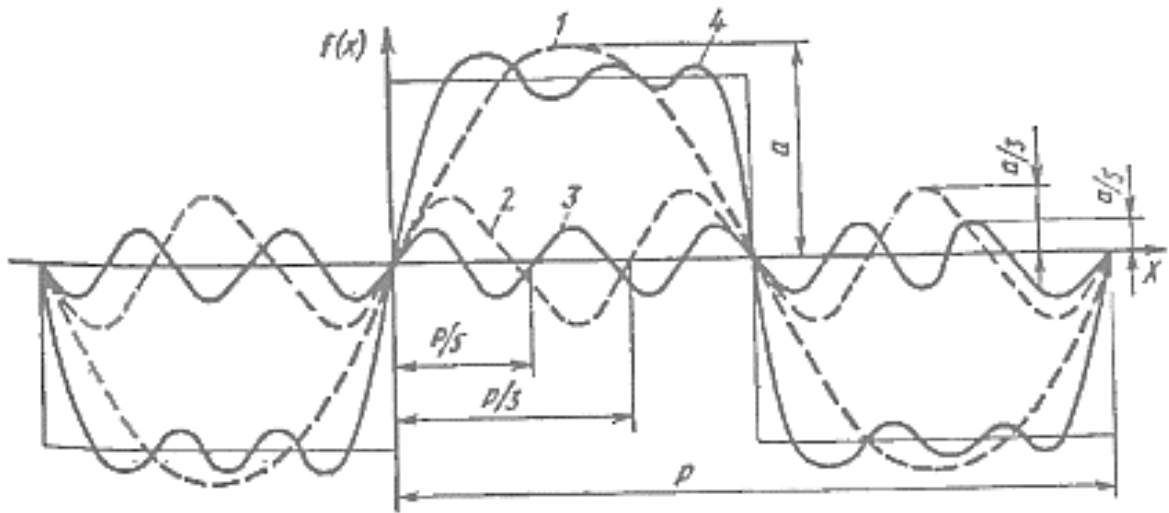


Рис. 1.5 Функція розподілу яскравості в прямокутній решітці

Зображуючи такий предмет, ОС передає кожен із складових із різними періодами p з спотвореннями по амплітуді a і фазі. Значення цих спотворень можливо виразити функціями від просторової частоти $T(N_x, N_y)$ і $\varphi(N_x, N_y)$. Вони залежать від залишкових аберацій, дифракційних явищ і погрешностей виготовлення ОС, тобто змінюються від тих факторів, які визначають якість зображення [4].

Розглядаючи рівняння процесу утворення зображення в окремому поданні:

$$\tilde{E}(N'_x, N'_y) = \tilde{A}(N'_x, N'_y) \tilde{L}(N'_x, N'_y) \quad (1.7)$$

де $\tilde{E}(N'_x, N'_y)$, $\tilde{A}(N'_x, N'_y)$ і $\tilde{L}(N'_x, N'_y)$ - перетворення Фур'є функції відповідно розподілу освітленості в зображенні $E(x', y')$, розсіювання оптичної системи $A(x', y')$ і розподілу яскравості $L(x', y')$ в предметі;

N'_x і N'_y - просторові частоти, що дорівнюють оберненому значенню періоду синусоїдальної зміни яскравості в площині предмета по тому ж напрямку; можливо знайти міру спотворення як відношення функції розподілу освітленості в зображенні до функції розподілу яскравості в предметі, що представляє собою ОПФ :

$$\tilde{A}(N'_x, N'_y) = \frac{\tilde{E}(N'_x, N'_y)}{\tilde{L}(N'_x, N'_y)} \quad (1.8)$$

Таким чином, ОПФ в математичному виразі представляє собою Фур'є перетворення функції розсіювання $A(x', y')$ ОС :

$$\text{ОПФ} = \tilde{A}(N'_x, N'_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x', y') e^{-i2\pi(N'_x x' + N'_y y')} dx dy \quad (1.9)$$

Виражаючи функцію (1.7) через модуль і аргумент, отримуємо :

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = |\tilde{A}(N'_x, N'_y)| e^{i\varphi(N_x, N_y)} = T(N'_x; N'_y) e^{i\varphi(N_x, N_y)} \quad (1.10)$$

Модуль ОПФ $T(N'_x; N'_y)$ показує залежність зміни амплітуди функції розподілу освітленості в зображенні від просторової частоти, а зміна амплітуди в площині зображення пропорційна коефіцієнту передачі контрасту предмета [4]. Іншими словами, модуль ОПФ характеризує здатність системи передавати контраст об'єкта при зображенні структур різної частоти [6].

Коефіцієнтом передачі контрасту T_N називають відношення контрасту зображення до контрасту предмету:

$$T_N = \frac{K_3}{K_{\Pi}} \quad (1.11)$$

Контраст для синусоїдального предмету і його зображення знаходять за формулою :

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (1.12)$$

де L_{max} і L_{min} – максимальна і мінімальна інтенсивності світла.

Модуль ОПФ називають частото-контрастною характеристикою (ЧКХ), так як вона показує залежність коефіцієнта передачі контрасту від просторової частоти, або просторово-частотною характеристикою (ПЧХ) , так як вона розглядається в двовимірному просторі, а також модуляційною передавальною функцією (МПФ) або функцією передачі модуляції (ФПМ) по аналогії з передачею електричних сигналів. Так як формула контрастів (1.12) для синусоїдального об'єкта аналогічна формулі модуляції для електричних сигналів, коефіцієнт передачі контрасту називають коефіцієнт передачі модуляції (КПМ). Тоді МПФ визначається як залежність КПМ від просторової частоти [4].

Аргумент ОПФ $\varphi(N'_x, N'_y)$ показує залежність фази від просторової частоти [4]. Іншими словами він характеризує правильність передачі оптичної системою просторового розташування малих структурних елементів [6]. Цю залежність називають частото-фазовою характеристикою (ЧФХ) або фазова передавальна функція (ФПФ).

Графічне уявлення функції МПФ (рис. 1.6) і ФПФ (рис. 1.7) для типового випадку показані для одного напрямку в площині зображення, тобто в напрямку сканування зображення. ФПМ нормується для нульової просторової частоти. При $N=0$ ФПМ має максимальне значення, рівне 1. Значення ФПФ при $N=0$ дорівнює 0. Максимальне значення зміни фази дорівнює 2π . Наявність ФПФ визначається несиметричністю функцію розсіювання ОС, що вказує на несиметричні залишкові аберації (кома). Якщо ж функція розсіювання симетрична, то не важко показати, використовуючи формулу (1.11), що ФПФ при цьому відсутня і ОПФ визначається тільки ФПМ. ОС високої якості мають невеликі фазові зміни, тому, як правило, дослідження проводять тільки по ФПМ, яка дає найбільш повну і об'єктивну інформацію про ОС [4].

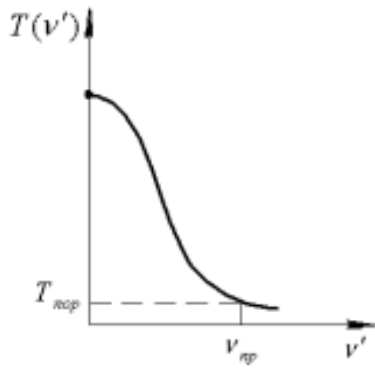


Рис. 1.6 Функція передачі модуляції

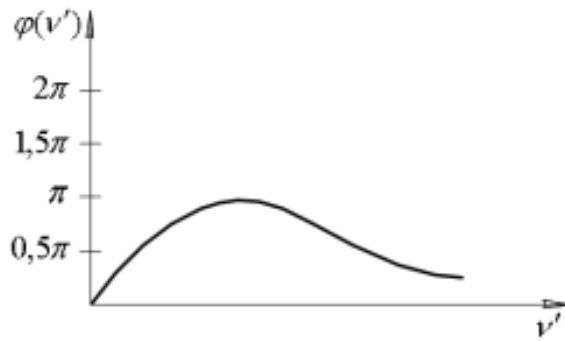


Рис. 1.7 Функція передачі фази

МПФ складної системи, що складається з окремих лінійних елементів, знаходять як добуток ФПМ кожного елемента системи :

$$T_C(N'_x, N'_y) = \prod_{t=1}^n T_t(N'_x, N'_y) \quad (1.13)$$

що дає можливість комбінування ФПМ окремих лінійних елементів, що входять в систему створення зображення [4].

При дослідженні ОС по ФПМ для виділення того або іншого параметру використовують різноманітні графічні уявлення залежності КПМ від просторової частоти в одному напрямку сканування. Якщо дослідження проводять в одній площині (в площині найкращого зображення), то будують криві залежності в координатах T і N для різних відносних отворів A_1, A_2, A_3 , для різних довжин хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, для центру і різних точок поля U_0, U_{10}, U_{20} в меридіональному і сагітальному перетині. ФПМ показують в вигляді розфокусованих кривих для різних просторових частот в центрі і по полю, в меридіональному і сагітальному перетині, що дозволяє виявити площину найкращого зображення [8]. По МПФ, виміряних для різних точок поля, спектральних областей, площини зображення, знаходять залишкові аберації ОС : кривизну поля, хроматизм, астигматизм, сферичну аберацію. Для виробничого контролю якості зображення ОС по ФПМ використовують числові критерії [4].

Як ми бачили, ОПФ може бути отримана як Фур'є-перетворення ФРТ.

Спектральний підхід до процесу утворення зображення оптичним приладом створює ряд переваг. Він дозволяє знаходити розподіл освітленості в зображенні, при відомій функції об'єкта і ФРТ і в той же час без обчислення згортки.

У приладах, призначених для передачі дрібної структури протяжних об'єктів (наприклад, в аерофотографії), можна значно наочніше судити про особливості передачі структури по ОПФ, ніж по ФРТ.

У приладах, призначених для отримання зображень точкових об'єктів (наприклад, в телескопах) або зображень лінії (в спектральних приладах) функції розсіювання дають саме пряме і наочне уявлення про якість зображення [6].

1.2 Числові критерії оцінки якості зображення

Практика оцінок оптичних систем в умовах їх великого серійного виробництва показує, що характеризувати якість зображення функціональною залежністю недостатньо зручно і надмірно трудомістко. Потрібно охарактеризувати якість зображення числами. Такі числа, називаються числовими критеріями якості зображення, і отримують їх : при аналізі обраної характеристики якості зображення, або безпосередньо з самого зображення обраного тест-об'єкта [6].

Лінійна роздільна здатність по Релею

Це один із перших критеріїв в історії. Він був розроблений з появою перших телескопів і мікроскопів. Лінійна роздільна здатність вимірюється як мінімальна відстань між двома точками об'єкта, при якій їх видно окремо через оптичний прилад [3]. Цей критерій показує здатність приладу зображувати два близько розташованих точкові предмети і дорівнює мінімальній відстані між ними, при якій зображення двох точок відрізняється від зображення однієї точки [2].

В залежності від прийнятого правила, по якому встановлюється вказана відмінність, роздільна здатність по Релею може мати різні значення. Зазвичай вирішальне правило пов'язують з відносною величиною ε провалу в розподілі інтенсивності в зображенні двох точок (рис. 1.8). При $\varepsilon = 0$ отримуємо абсолютний критерій розділення σ_0 [2, 9]

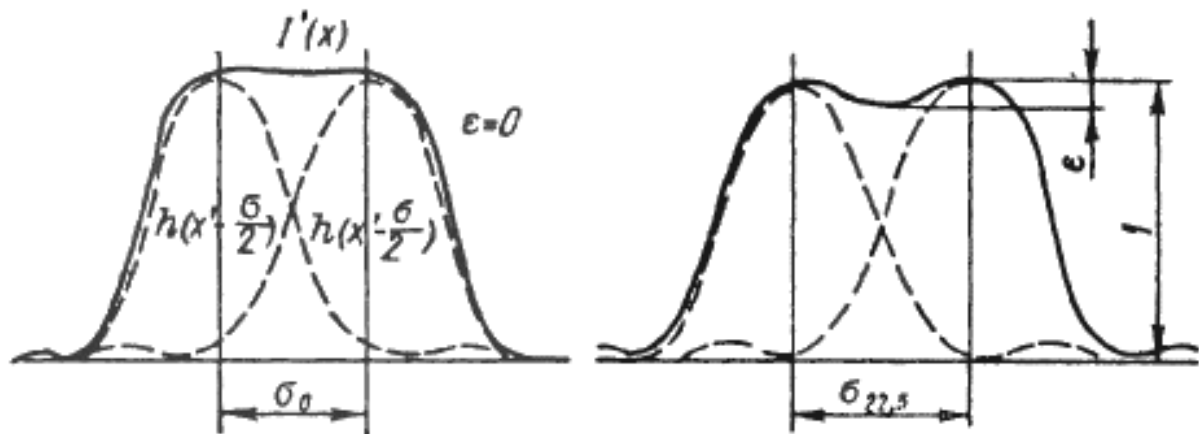


Рис. 1.8 Роздільна здатність по Релею:

1 – абсолютний критерій, 2– критерій Релея.

Визначимо лінійний роздільну здатність за допомогою ФРТ і ОПФ. Якщо $D_1(y, z); D_2(y, z)$ - розподіл освітленості в двох роздільних зображеннях світних точок, то при близькому розташуванні точок їх зображення частково накладаються один на одного і дають деяке сумарне розподілення освітленості. Позначивши відстань між точками в об'єкті як ε , визначимо контраст в зображенні пари точок [3]:

$$K = \frac{I(y = 0) - \left(y = \frac{\varepsilon}{2}\right)}{I(y = 0)} \geq K_{\pi} \quad (1.14)$$

де K_{π} – пороговий контраст приймача зображення.

Правило Релея потребує, щоб центральний максимум в зображенні однієї точки припадав би на перший мінімум в зображенні іншої, для без абераційних

ОС це відповідає значенню $\varepsilon = 0,255$, а отже $\sigma_R = \sigma_{22,5}$. Для ОС роздільна здатність по Релею визначається абераціями, а також розмірами і формою зіниці. Для виключення останніх зручно виражати σ_R в канонічних координатах, при цьому для круглої зіниці при відсутності аберацій маємо: $\sigma_0 = 0,5$; $\sigma_{22,5} = 0,61$ канонічних одиниць [2].

Цю відстань можна визначити за формулою [4]:

$$\sigma_0 = \frac{1,22\lambda f'}{D} \quad (1.15)$$

де λ – довжина хвилі,

f' і D – відповідно фокусна відстань і діаметр вхідної зіниці об'єктива.

Роздільна здатність по Релею задовільно характеризує якість зображення астрономічних телескопів, спектральних приладів, для яких предметами є близько розташовані точки або лінії [2].

Роздільна здатність по Фуко

Цей критерій застосовується для оцінки якості зображення фото-, теле-, і кінооб'єктів, що передають об'єкти складної структури. Роздільна здатність R знаходиться як максимальна просторова частота періодичного тест – об'єкту, що складається з чорно – білих штрихів (міри Фуко), в зображенні якого ще видні штрихи, і виражається в лініях на міліметр або кутовій хвилині, в залежності від типу предмету і зображення [2].

Роздільна здатність визначається параметрами МПФ приладу, кривою контрастної чутливості приймача зображення і контрастом об'єкта – міри. Зазвичай її визначають для міри одиничного (абсолютного) контрасту. Якщо приймачем є око, то мають на увазі візуальну роздільну здатність R_v , якщо фотографічна плівка – фотографічну роздільну здатність R_ϕ . Зазвичай $R_v > R_\phi$ (рис. 9). Якщо ж приймачем є гіпотетичний ідеальний приймач, який може розрізняти в зображенні дуже малий але відмінний від нуля контраст, то мають

на увазі граничну роздільну здатність R_0 , що залежить від МПФ приладу. Для ОС R_0 визначається розмірами зіниці, довжиною хвилі і абераціями. При відсутності аберацій для некогерентного випромінювача [2]:

$$R_0 = \frac{2A}{\lambda} \quad (1.16)$$

Недоліком цього критерію є мала коректність, тобто мала стійкість до дій невеликих змін впливових факторів і не висока кореляція з істинною якістю зображення, що визначається по тій задачі, для якої будується зображення.

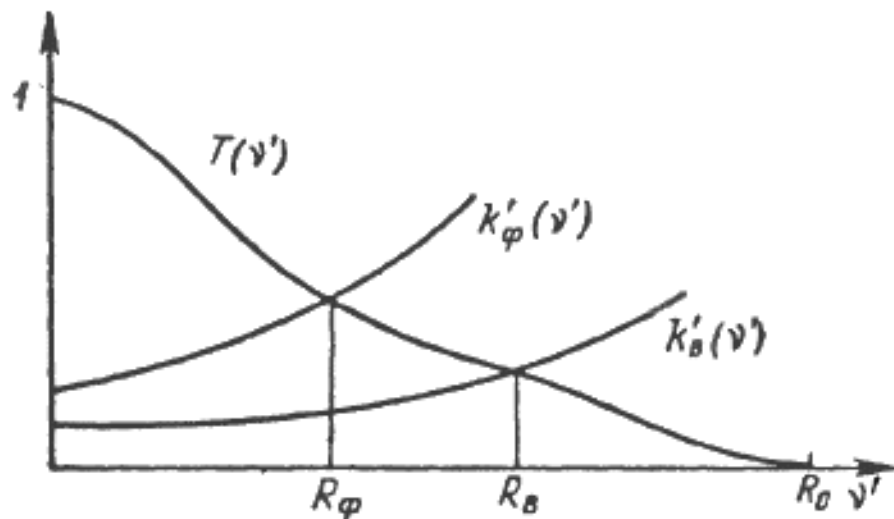


Рис. 1.9 Роздільна здатність по Фуко,

де $T(v')$ - МПФ приладу, $k'_v(v')$ і $k'_\phi(v')$ - функції контрастної чутливості ока і фотоматеріалу.

Частотний критерій

На практиці роздільна здатність часто знаходять по граничному числу ліній R , відтворюваних на 1 мм довжини зображення [3]:

$$R = \frac{1,64A'}{\lambda} \quad (1.17)$$

де A' - задня апертура досліджуваної системи.

Величина дозволу показує, яку частоту можна відтворити при даній апертурі ідеальною системою, тобто системою, яка не має аберацій і формує сферичний хвильовий фронт.

Для оцінки по частотним критеріям користуються ФПМ. Графіки МПФ дозволяють здійснити аналіз створюваного об'єктивом зображення і наочно показують, з яким контрастом передає об'єктив ту чи іншу просторову частоту. Критерієм оцінки якості системи по МПФ служить точка перетину графіка МПФ і графіка контрастної чутливості приймача зображення.

Застосовуючи частотні критерії до об'єктивів, які будують зображення для подальшого розглядання, прагнуть до визначення числових співвідношень, що зв'язують результати вимірювань з суб'єктивною оцінкою якості зображення. При цьому критерії класифікуються відповідно до вимог, що пред'являються до зображення [3].

Граничний градієнт

Граничний градієнт G_{max} – тангенс кута α_{max} нахилу дотичної в центральній точці граничної кривої до осі абсцис (рис 1.10), що характеризує різкість зображення, $G_{\Phi max}$ – те ж для фотографічної граничної кривої [7] :

$$G_{max} = tg \alpha_{max} = \frac{\Delta E}{\Delta x'} \quad (1.23)$$

$$G_{\Phi max} = \frac{\Delta D}{\Delta x''} \quad (1.19)$$

де ΔE – приріст освітленості оптичного зображення граничного тесту,
 ΔD - приріст густини почорніння фотографічного зображення граничного тесту,

$\Delta x'$ і $\Delta x''$ - інтервали на осі абсцис.

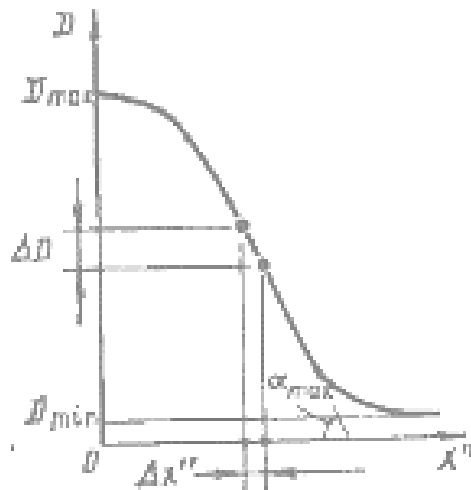


Рис. 1.10 Фотографічна гранична крива

Критерій перепаду

Критерій p , що враховує перепад максимальної і мінімальної освітленості, або критерій p_Φ густини почорніння фотоплівки, характеризує різкість і контраст зображення [7] :

$$p = (E_{max} - E_{min})G_{max} \quad (1.20)$$

$$p_\Phi = (E_{max} - E_{min})G_{\Phi max} \quad (1.21)$$

Число Штреля

Число Штреля (визначальна яскравість або чіткість по Штрелю) S – відношення значень ФРТ в її максимуму для даного і ідеального (безабераційного) приладу [2]:

$$S = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(v'_x, v'_y) dv'_x dv'_y}{\iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_0(v'_x, v'_y) dv'_x dv'_y} \quad (1.22)$$

де $\tilde{A}_0(v'_x, v'_y)$ – ОПФ безабераційної оптичної системи;

$\tilde{A}(v'_x, v'_y)$ – ОПФ реальної оптичної системи.

Число Штреля це відношення найбільших значень освітленості в центрі дифракційної плями реальної системи, для якої хвильова аберація не дорівнює нулю, і безабераційної системи. Тобто, це найбільше нормоване значення освітленості в дифракційній картині зображення від точкового джерела [8].

$$S = \frac{A(w \neq 0)}{A(w = 0)} \quad (1.23)$$

де A – освітленість,

W - параметр, що характеризує значення хвильової аберації.

Встановлено, що оптична система є високоякісною, якщо $S \geq 0,8$

Критерій Саянагі

Деяким узагальненням числа Штреля можна вважати критерій Саянагі, що враховує МПФ $|D_R(v')|$ приймача зображення [2]:

$$S = \frac{\iint |D(v')D_R(v')| dv'}{\iint D_R(v') dv'} \quad (1.24)$$

Статистичні критерії

Ці критерії отримані на основі дослідження якості вирішення задачі, для якої формується зображення, з урахуванням похибок аналізу зображення, що визвано шумами приймача. В статичній теорії шум вважають адитивним, гауссовим і білим. Таким чином, зображення, яке спостерігається представляється в вигляді [2]:

$$I'(x') = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x)h(x' - x) dx + n(x') \quad (1.25)$$

де $n(x')$ - випадкова функція, що описує шум.

Передбачається, що відомі характеристики приладу, ФРТ $h(x')$ або ОПФ $D(\nu)$, а також деякі апріорні відомості про об'єкт. В так званих параметричних задачах або задачах матеріальних приладів вважають, що вхідний сигнал відомий з точністю до одного або декількох параметрів $I = I(x, a)$, де a – невідомий параметр. В цьому випадку якість зображення оцінюється по дисперсії оцінки a вимірюваного параметра, отриманій із аналізу зашумленого зображення. В задачах розрізнення гіпотез вважається, що вхідний сигнал відомий з точністю до вибору із двох альтернативних функцій $I_0(x)$ і $I_1(x)$. Якість зображення оцінюється по випадковості помилки в розрізненні цих сигналів по зашумленому зображенню. В обох випадках якість зображення оцінюють наступним функціоналом – статичною роздільною здатністю [2]:

$$R_s = \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(\nu) |D(\nu)|^2 d\nu \quad (1.26)$$

де $\Phi(\nu)$ – функція задачі.

$$\Phi(\nu) = \begin{cases} S^{-1}(\nu) \left| \frac{\partial I(\nu)}{\partial a} \right|^2 & \text{для параметричних задач} \\ S^{-1}(\nu) |I_0(\nu) - I_1(\nu)|^2 & \text{для задач з гіпотезами} \end{cases} \quad (1.27)$$

де $S(\nu)$ – спектр Вінера шуму.

Концентрація енергії в плямі розсіювання

Значення концентрації енергії плями розсіювання в гуртку заданого діаметра широко використовується в якості критерію оцінки якості астрономічних систем.

Строго кажучи, енергія розподілена по всій площині, в якій сформовано зображення світної точки. Однак цей розподіл надзвичайно нерівномірний, і

близько 84% всієї енергії, що пройшла через зіницю при відсутності аберацій, зосереджено в центральному максимумі дифракційної плями.

Концентрацію енергії визначають, виходячи з ФРТ системи, і висловлюють у вигляді процентного відношення кількості енергії, сконцентрованої в гуртку даного діаметра, до всієї енергії, яка формує пляма розсіювання [3]:

$$L_k = \frac{F_d}{F} \quad (1.28)$$

$$F_d = \int_0^{d/2=r} D(r) r dr \quad (1.29)$$

де $D(r)$ – ФРТ.

З іншого боку, вся енергія в плямі розсіювання :

$$F = \int_0^{\infty} D(r) r dr \quad (1.30)$$

Величини F і F_d в ряді випадків можуть бути безпосередньо виміряні фотометром. Крім того, їх можна визначити математичною обробкою ФРТ, методика вимірювання якої розглянута в табл. 1.1 [3].

Таблиця 1.1 Концентрація енергії для ФРТ ідеальної системи

Z	3,832	7,016	10,173	13,324	16,471
$L_k(y')$	0,8378	0,9099	0,9376	0,9523	0,9614
Диф.мінімум	1	2	3	4	5

Висновки до першого розділу

Вибір тієї чи іншої характеристики якості зображення об'єктива залежить від його призначення :

- вузькопольові об'єктиви для телескопічних систем краще характеризувати функцією розсіювання;
- фотографічні об'єктиви краще характеризувати граничною кривою;
- об'єктиви, що використовуються в інфрачервоних пристроях краще характеризувати функцією концентрації енергії;
- універсальною і найбільш інформативною характеристикою якості зображення об'єктивів є оптична передавальна функція та її складові: модуляційна передавальна функція та фазова передавальна функція.

Для кількісної оцінки якості зображення варто користуватись числовими критеріями, що отримані на основі цих характеристик:

- радіус кола розсіювання;
- максимальна роздільна здатність;
- критерій перепаду;
- число Штреля;
- коефіцієнт передачі модуляції при певній просторовій частоті.

Розділ 2. Методи контролю якості зображення

Використовують різні методи контролю якості зображення об'єктів. На базі цих методів розробляється стендова апаратура. Сучасні методи контролю якості зображення в більшості випадків побудовані на вимірюванні ФРЛ з наступним Фур'є перетворенням для визначення складових ОПФ. Розглянемо особливості цих методів з врахуванням їх переваг і недоліків.

2.1. Установки з механічним скануванням в площині зображення

Ці установки найбільш прості по конструкції, збираються на оптичній лаві і діють за принципом фотоелектричного фотометра. Такі установки використовують сканування зображення, що будується оптичною системою яка випробується. В установках використовуються неперіодичний тест-об'єкти у вигляді точки, що світиться, або лінії. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії, що світиться показано на рис. 2.1 [11].

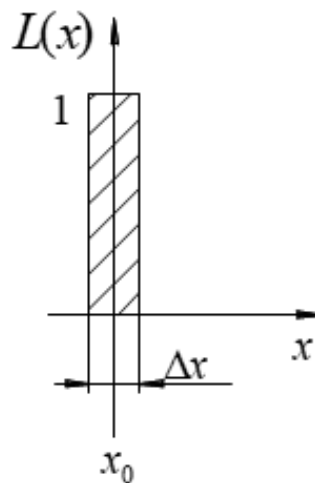


Рис. 2.1. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії, що світиться.

При цьому вважається що $\Delta x \rightarrow 0$. Такий закон розподілу яскравості має назву одиничного імпульсу. Функція $L(x)$ називається дельта-функцією і позначається $\delta(x)$. Вона дорівнює нулю в усіх випадках, крім випадків, коли точка $x = x_0$. При цьому площа імпульсу вважається кінцевою і дорівнює одиниці:

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Умова нормування має наступний вигляд:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (2.2)$$

Спектр цієї функції з урахуванням перетворення Фур'є має наступний вигляд:

$$\tilde{L}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-2\pi\nu x} dx \quad (2.3)$$

Враховуючи можливість розкладання $e^{-j2\pi\nu x}$ за використанням формули Ейлера можна дійти висновку, що модуль оптичної передавальної функції міститиме косинус-гармоніки, значення яких при $x = 0$ рівні 1 для усіх просторових частот $\cos(2\pi\nu x)$. Тобто спектр цієї функції містить усі гармоніки з амплітудою, рівною 1, а фазова характеристика такого сигналу дорівнює 0 для усіх просторових частот, що показано на рис. 2.2 [10].

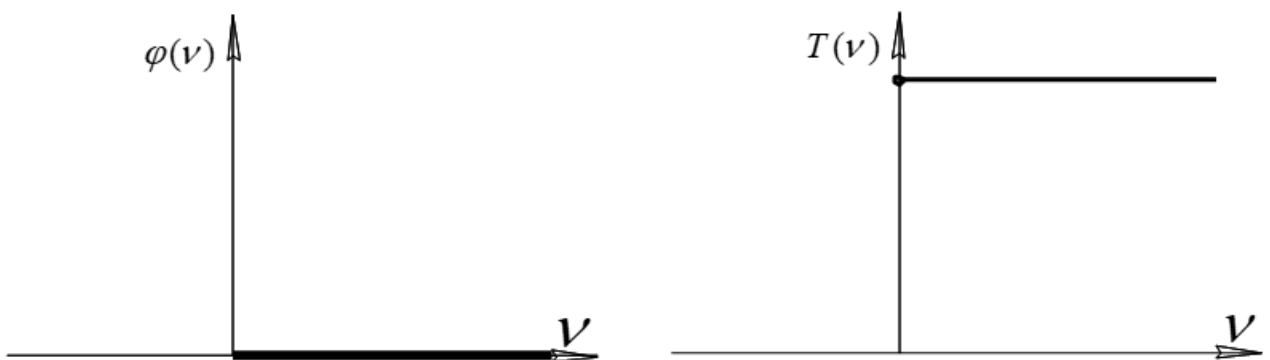


Рис. 2.2. Спектральні характеристики одиничного імпульсу.

Схема установки представлена на рис. 2.3. Установка містить: 1– джерело світла (лампа розжарювання); 2–конденсор; 3– світлофільтр, розрахований на спектральну область роботи випробовуваного об'єктиву; 4– світлорозсіювач або

молочне скло; 5– тест-об'єкт; 6– коліматорний об'єктив; 7– випробовуваний об'єктив; 8– проєкційний мікрооб'єктив; 9– аналізуюча (щілина) діафрагма; 10– приймач променистої енергії (одноелементний); 11– підсилювач; 12– блок реєстрації; 13– кроковий двигун, що забезпечує переміщення з блоком управління кроковим двигуном

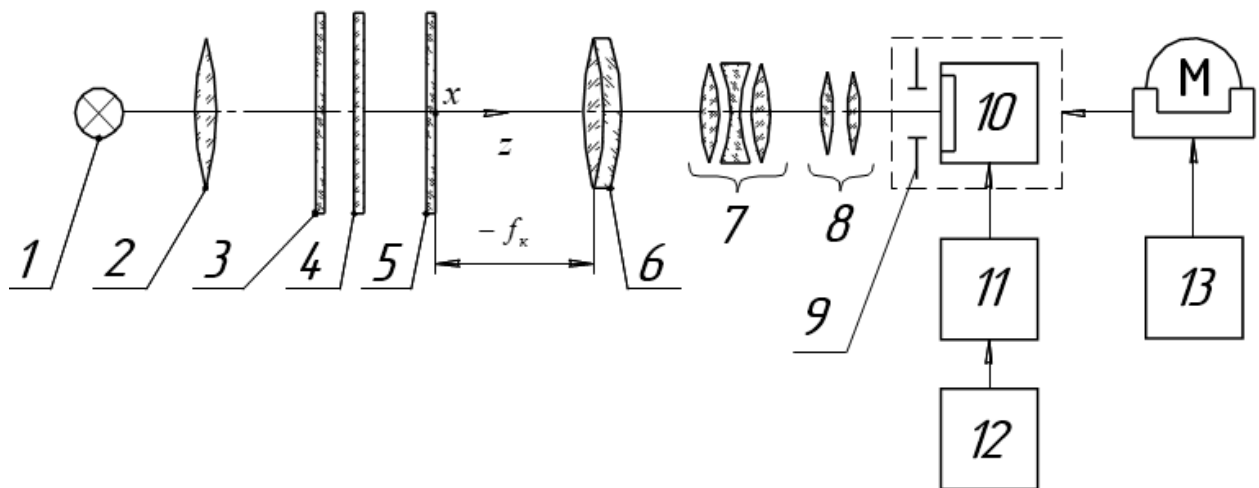


Рис. 2.3. Схема установки з гармонійним аналізом оптичного сигналу.

Вимірювання ФРЛ відбувається при поперечному механічному скануванні одноелементним фотоприймачем зображення щілинної діафрагми. Перевагою метода є відносна простота конструкції установки. Недоліки полягають в необхідності використання прецизійного механізму механічного сканування приймачем випромінювання і неможливості отримання результатів в реальному масштабі часу. Особливо це важливо в тому випадку коли контроль якості зображення відбувається під час складання і юстування об'єктивів [10].

2.2. Установки з використанням ЛПЗЗ приймачів в площині зображення

Схема установки з неперіодичним тест - об'єктом де в якості фотоприймача використовується ЛППЗ представлена на рис. 2.4. Установка містить наступні елементи: 1–джерело випромінювання; 2–конденсор; 3–призма Дове (призначена для обертання зображення джерела випромінювання при розташуванні щілини 7 в горизонтальній або вертикальній площинах при

визначенні якості зображення в меридіональній і сагітальній площинах); 4– дзеркальний конденсор; 5–набір змінних світлофільтрів, розрахованих на спектральні діапазони роботи випробовуваних об'єктів; 6–світлорозсіювач (молочне скло); 7–вузол щілинної діафрагми з можливістю її розвороту в горизонтальну і вертикальну площини; 8– коліматорний ; 9– випробовуваний об'єktiv; 10–проекційний мікрооб'єktiv; 11–фотоприймач ЛППЗ; 12– електронний блок; 13–формувавч відеосигналу; 14–аналого-цифровий перетворювач; 15–інтерфейс; 16–комп'ютер, що виконує дискретне перетворення Фур'є і документує результати виміру; 17–поворотний стіл для оцінки якості зображення по центру і по краях поля зору.

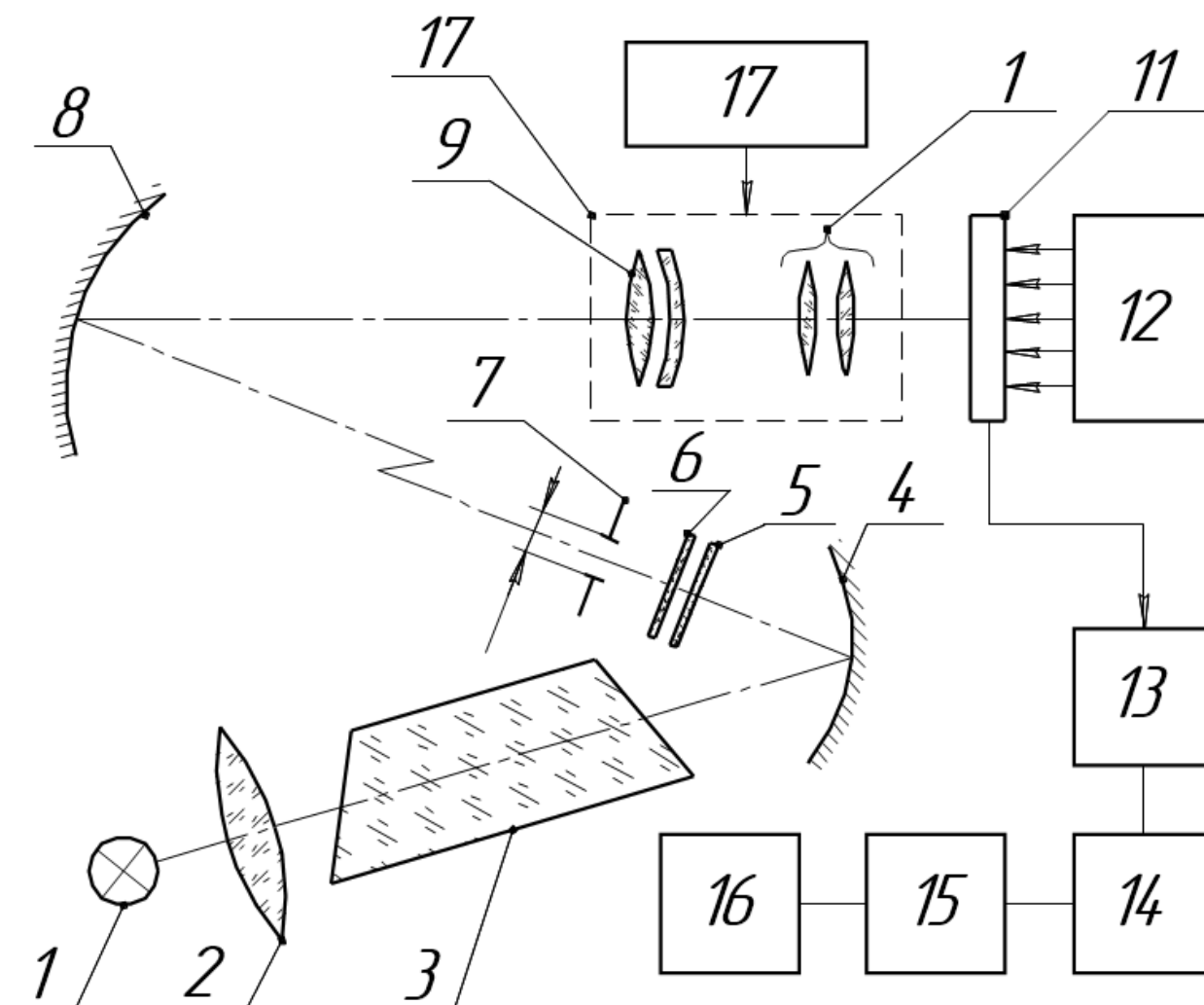


Рис. 2.4. Схема установки з неперіодичним тест - об'єктом і приймачем ЛППЗ.

При визначенні ОПФ за допомогою ЛППЗ використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [16]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\left\{\frac{-j2\pi mk}{N}\right\} \quad (2.4)$$

де T -період дискретизації значень ФРЛ;

$S_{x'k}$ - нормоване значення ФРЛ;

$k = 0,1,2 \dots N - 1$ – номер відліку у масиві ФРЛ;

$m = 0,1,2 \dots$ - номер дискретного значення просторової частоти;

x' - лінійна координата в площині зображення.

З урахуванням (1) та формули Ейлера МПФ, як модуль ОПФ дорівнює:

$$|\tilde{S}(v'_m)| = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2} \quad (2.5)$$

Для того щоб МПФ об'єктива розрахована із співвідношення (2.5) відповідала її дійсному значенню з припустимими похибками вузол фотометрирування повинен задовольняти наступним умовам:

- частотна характеристика ЛППЗ не повинна впливати на результати вимірювань;
- похибка, що виникає внаслідок осереднення значень освітленості чутливими елементами ЛППЗ не повинна перевищувати припустиму;
- спотворення спектру сигналу, що виникає внаслідок накладання спектру шумів не повинно перевищувати припустимої величини.

Впливу частотної характеристики ЛППЗ на результат вимірювання МПФ можна уникнути, якщо ФРЛ $S_{x'k}$ дискретизувати з досить високою частотою. Одним з засобів підвищення ступеня дискретизації є використання у вузлі

фотометрирування мікрооб'єктиву із збільшенням β , яке знаходиться із співвідношення [16]:

$$\beta \geq \nu_{max} 2T \quad (2.6)$$

де ν_{max} - максимальна просторова частота об'єктиву, що досліджується;

T - період дискретизації чутливих елементів ЛППЗ.

Одним з засобів знаходження параметрів вузла фотометрирування, щоб задовольнити іншим вимогам є комп'ютерне моделювання. При розробці математичної моделі процесу вимірювань на стенді ФРЛ об'єктиву була апроксимована залежністю [16]:

$$S_{x'} = \exp \left\{ - \left(\frac{x'}{\beta 2\rho} \right)^2 \right\} \quad (2.7)$$

де ρ - коефіцієнт апроксимації;

x' - лінійна координата в площині ЛППЗ.

Було враховано, що існує залежність між коефіцієнтом апроксимації ρ та радіусом кола E_r для об'єктиву. З [11] слідує, що $\rho = 0,36\rho_E$, де ρ_E знаходиться за формулою [16]:

$$\rho_E = 1,22 \frac{\lambda f'}{D} \quad (2.8)$$

де λ - довжина хвилі світла;

f' - фокусна відстань об'єктиву;

D - діаметр вхідної зіниці об'єктиву.

В математичній моделі були прийняті різні значення ρ , які відповідали певним типам об'єктивів, що підлягали дослідженню. Оскільки в загальному випадку, внаслідок існування несиметричних аберацій, ФРЛ може бути несиметричною, то ліва і права частина функції апроксимації будувалися окремо

із своїм коефіцієнтом ρ . Вплив збільшення мікрооб'єктиву враховувався за допомогою коефіцієнта β згідно виразу:

$$S_{x'_0} = \exp \left\{ - \left(\frac{x'}{\beta \cdot 2\rho} \right)^2 \right\} \quad (2.9)$$

Таким чином був здійснений перехід від площини ЛППЗ до фокальної площини об'єктиву, що підлягав дослідженню. Основними параметрами ЛППЗ, що моделювалися були кількість чутливих елементів N та період їх слідування T . Модуль ОПФ розраховувався із співвідношення (2.5), як дискретне N -точкове перетворення Фур'є. Моделювання процесу осереднення ФРЛ в межах чутливого елемента відбувалось шляхом збільшення крапок у дискретному Фур'є-перетворенні до $10N$.

Для визначення ідеальної МПФ₀ використовувалась матриця значень вибраної апроксимуючої кривої ФРЛ з $10N$ -точковим перетворенням Фур'є. Потім на ділянці ФРЛ, що відповідала 10 крапкам знаходили середнє значення апроксимуючої функції, приймали його сталим для кожного чутливого елемента і скориставшись N -точковим перетворенням Фур'є обраховували реальне значення МПФ_р. Відхилення значень реальної МПФ_р від ідеальної МПФ₀ характеризувало похибку вимірювань і обраховувалось за формулою [16]:

$$\Lambda = \frac{|МПФ_0 - МПФ_r|}{МПФ_0} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Математичне моделювання передбачало також аналіз впливу випадкових шумів на результати визначення МПФ. Модель впливу шуму передбачала накидання на корисний сигнал шумових складових у вигляді гармонічних функцій із змінними амплітудами і фазами за формулою:

$$S_{x'} = \exp \left[- \left(\frac{x'}{\beta \cdot 2\rho} \right)^2 \right] + a \cdot \sin x' \quad (2.11)$$

де a - амплітуда шумів.

Похибка визначення МПФ обраховувалась за формулою аналогічною (2.10), де МПФ₀ і МПФ_р відповідало значенням цієї функції при відсутності і наявності шумової складової.

Під час комп'ютерного моделювання роботи вузла фотометрирування використовувались наступні значення змінних параметрів:

- апроксимуючий коефіцієнт $2\rho = 10; 15; 20; 25; 30$;
- період слідування чутливих елементів ЛППЗ $T = 11; 13; 20; 25 \text{ мкм}$ (відповідали приладам, що виготовляють фірми Sony; Kodak; Hamamatsu; Fairchild Image для різних спектральних діапазонів);
- амплітуди шумів $a = 0,005 \dots 0,1$ від максимального нормованого значення ФРЛ;
- рівні обмеження вихідного сигналу: $0,005 \dots 0,1$ від максимального нормованого значення ФРЛ;
- максимальна можлива похибка визначення МПФ – 2%.

В результаті проведеного моделювання була отримана серія номограм для різних типів ЛППЗ. На рис. 2.5 представлена одна з номограм за допомогою якої можна визначити необхідне значення збільшення мікрооб'єктиву у вузлі фотометрирування при використанні ЛППЗ з періодом слідування чутливих елементів $T=13 \text{ мкм}$. Для користування номограмами слід попередньо розрахувати за співвідношенням (2.8) значення радіусу кола Ермі об'єктиву, що підлягає дослідженню, потім визначити коефіцієнт апроксимації ρ і з використанням допоміжної прямої по шкалі β знайти необхідне значення збільшення мікрооб'єктиву. При цьому похибка визначення МПФ, що обумовлена розглянутими факторами не перевищуватиме 2%. Як приклади на номограмах знайдені значення β для коефіцієнтів апроксимації $2\rho = 10, 15, 20, 30, 40 \text{ мкм}$.

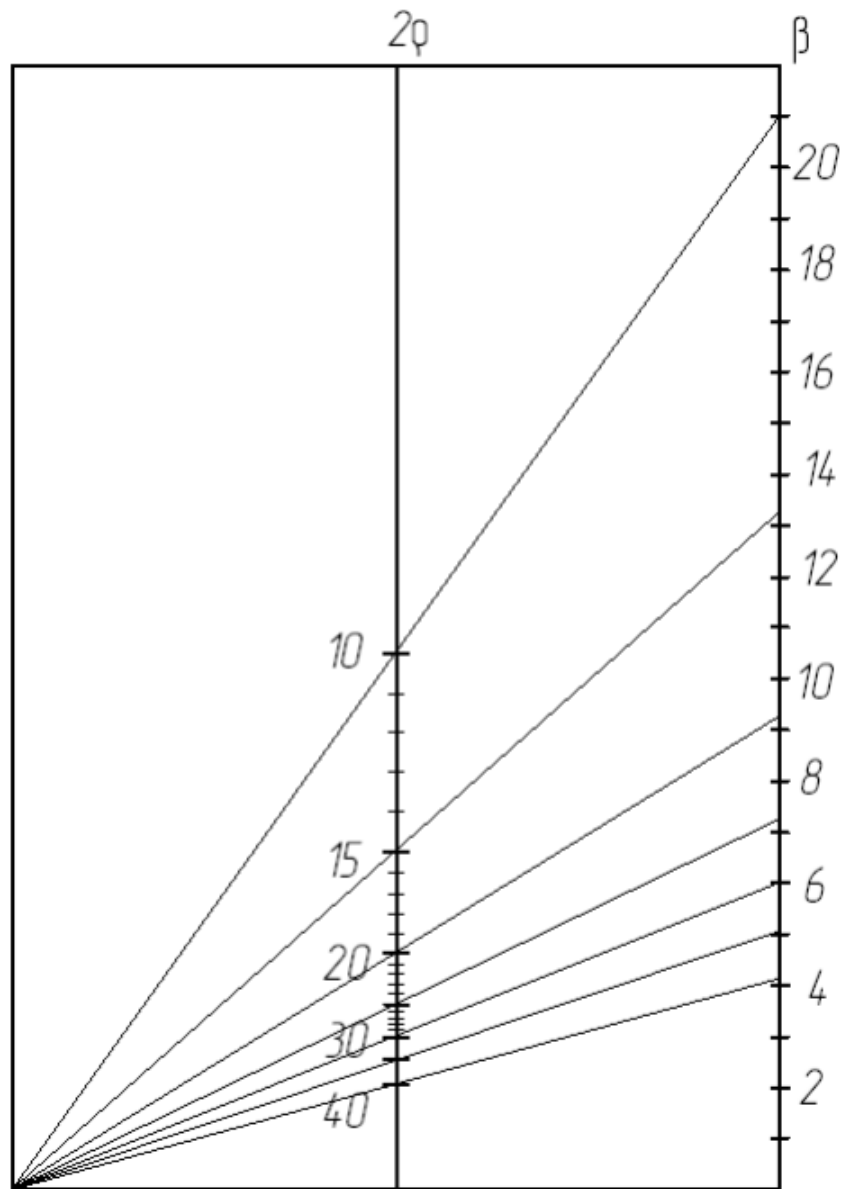


Рис. 2.5. Монограма для визначення збільшення мікрооб'єктиву

Комп'ютерне моделювання впливу обмеження шумової складової сигналу на похибку визначення МПФ дало наступні результати. Якісна залежність зміни похибки вимірювання МПФ від просторової частоти при певному рівні обмеження зберігається для ЛППЗ з різними періодами слідування чутливих елементів. Припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дозволяють зменшити похибку визначення МПФ не повинні перевищувати 0,01 максимального нормованого значення ФРЛ. Із збільшенням рівня обмеження максимум похибки визначення МПФ зсувається в бік більш високих просторових частот. За допомогою обмеження рівня вихідного сигналу найбільш

суттєво можна компенсувати похибку визначення МПФ в зоні середніх і високих просторових частот. Як приклад при моделюванні результатів, на рис. 2.6 а-г наведені залежності зміни похибки визначення МПФ від просторової частоти для ЛППЗ з періодом $T=25\mu\text{м}$, коефіцієнтом апроксимації $2\rho = 10$, збільшенням мікрооб'єктиву $\beta = 35^{\times}$.

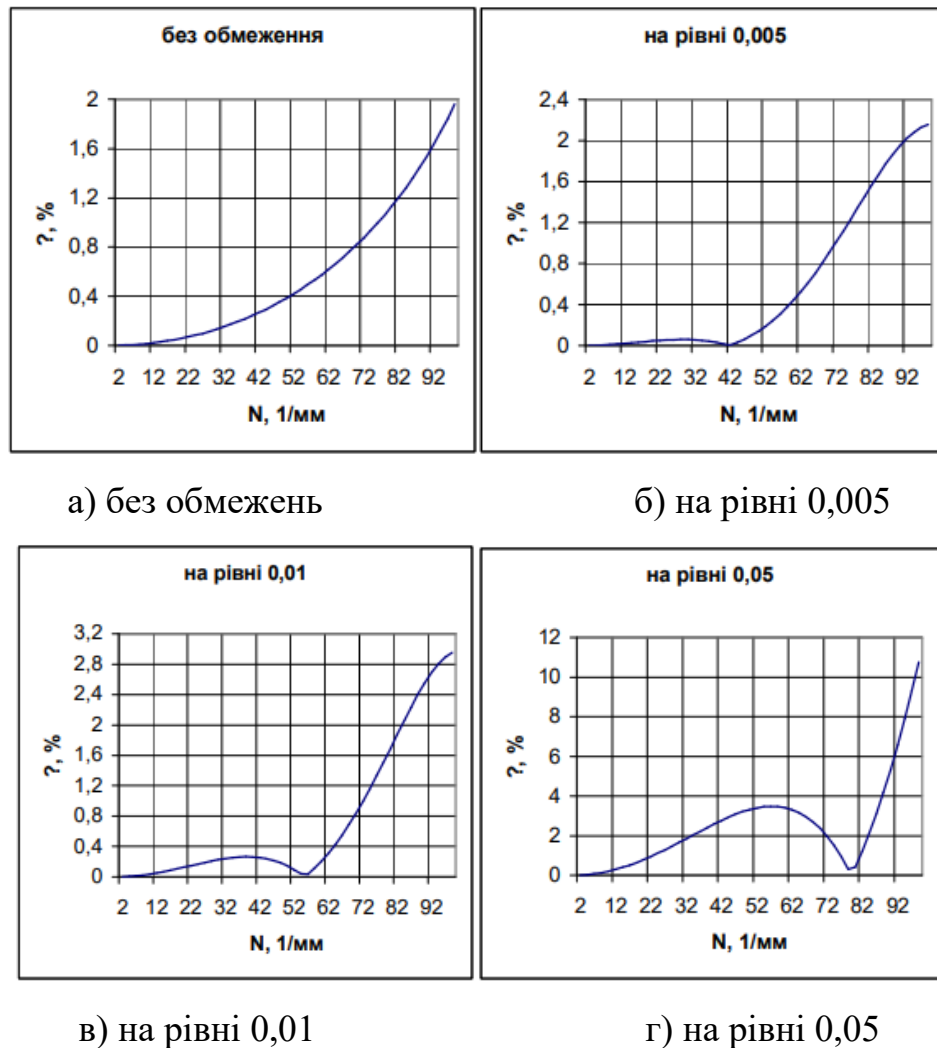


Рис. 2.6. Залежність похибки визначення МПФ від рівня обмеження вихідного сигналу ЛППЗ

Результати комп'ютерного моделювання показали, що вигляд залежності впливу обмеження нижнього рівня сигналу ЛППЗ на похибку визначення МПФ залишається незмінним для ЛППЗ різних періодів, типових значень коефіцієнтів апроксимації 2ρ та збільшень мікрооб'єктиву. На рис.2.6 як приклад, наведено отримані в результаті моделювання залежності зміни похибки визначення МПФ від просторової частоти для ЛППЗ з періодом $T = 25$

мкм, коефіцієнтом апроксимації $2\rho = 10$, збільшенням мікрооб'єктиву $\beta = 40$ і рівнях обмеження вихідного сигналу, що складав $0,005 \dots 0,01$ від максимального нормованого значення ФРЛ.

Таким чином проведене комп'ютерне моделювання дозволило отримати результати, що дозволяють визначити необхідне значення збільшення мікрооб'єктиву β у вузлі фотометрирування стенду вимірювання МПФ, а також визначити припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дають можливість зменшити похибку вимірювання МПФ.

Як видно з рис.2.6 припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дозволяють зменшити похибку визначення МПФ, не повинні перевищувати $0,01$ максимального нормованого значення ФРЛ, позаяк надалі похибка визначення МПФ починає суттєво зростати. Із збільшенням рівня обмеження максимум похибки визначення МПФ зсувається в бік більш високих просторових частот. За допомогою обмеження рівня вихідного сигналу найбільш суттєво можна компенсувати похибку визначення МПФ в зоні середніх і високих просторових частот.

2.3. Установки з використанням мікроболометричних матриць в площині зображення

Такі установки використовуються для контролю якості зображення об'єктів, що працюють в інфрачервоній області спектру. Схема установки приведена на рис. 2.6. Установка містить випромінювач (глобар) 1, конденсор 2, світлофільтри 3, тест-об'єкт 4, встановлений в фокальній площині інфрачервоного коліматорного об'єктиву 5, об'єктиву що контролюється 6, блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал 7, що містить мікроболометричну телевізійну камеру 8, вихід якої підключено до першого входу електронно обчислювальної машини 9, вихід ЕОМ підключено до контролеру 10, перший вихід котрого підключено до шагового двигуна 10, який підключено до тест-об'єкта, а другий вихід контролеру підключено до другого входу ЕОМ [13].

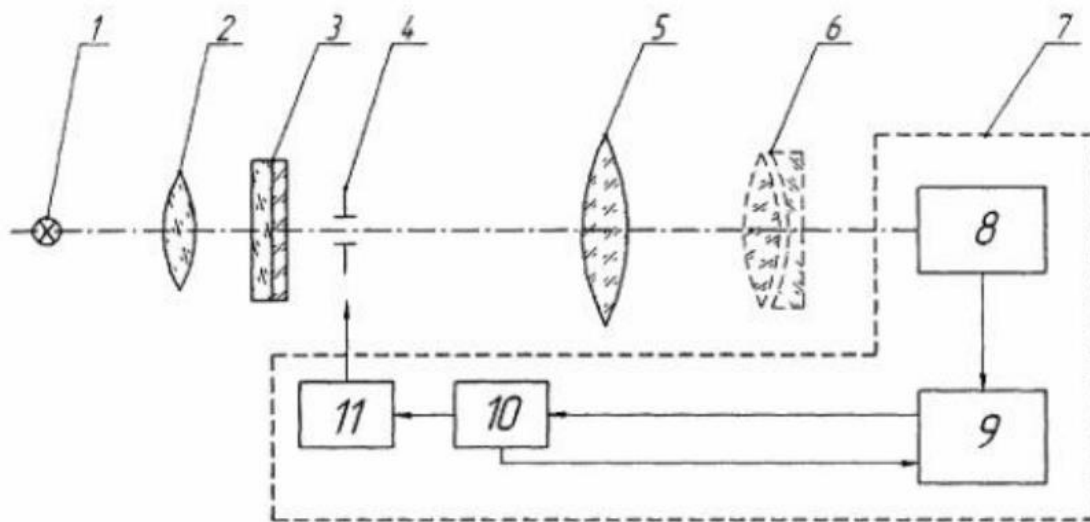


Рис. 2.6. Функціональна схема пристрою

Пристрій працює наступним чином. Завдяки випромінювачу 1 через конденсор 2, світлофільтри 3 освітлюють тест-об'єкт 4, що являє собою регульовану по ширині прямокутну щілину. Коліматорним об'єктивом 5 проектується зображення тест-об'єкта на нескінченність. В паралельному ході променів за коліматорним об'єктивом встановлюють об'єktiv що контролюється 6, в фокальній площині якого отримується зображення щілини, контури котрої показані на рис.2.7. В фокальній площині об'єктиву, що контролюється встановлено блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал 7, в якому містяться мікроболометрична телевізійна камера 8, яка знімає дані вимірювання функції розсіювання та результати передаються на ЕОМ 9. В початковому положенні тест-об'єкт встановлено перпендикулярно відносно оптичної вісі, потім тест-об'єкт повертається на граничний кут γ за допомогою крокового двигуна 10 з контролером 9, а з телевізійної камери знімають отриманні дані, які передаються на ЕОМ. ЕОМ здійснює дискретне перетворення Фур'є вхідної послідовності чисел, результатом якого є ОПФ об'єктива що контролюється [13].

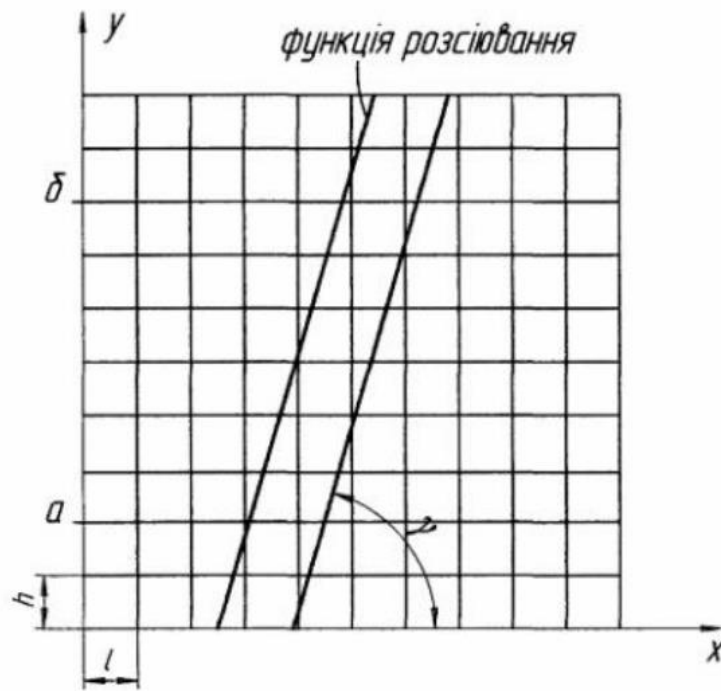


Рис. 2.7. Взаємне розташування зображення тест-об'єкту
і площини матричного приймача.

ЕОМ в залежності від розрахункової роздільної здатності об'єктиву, що випробовується, визначає необхідну кількість вимірів, які характеризують розподілення випромінювання в функцію розсіювання для обчислення складових ОПФ з потрібною точністю. Реально ця кількість відліків обмежена і залежить від ширини функції розсіювання і лінійного розміру пікселя матричного перетворювача.

Наприклад, на рис. 2.8 наведено випадок, коли функція розсіювання проектується лише на 4 рядки пікселів матричного приймача. На рис. 2.8 позначено x - координата в напрямку рядку матричного приймача, яка відповідає напрямку зчитування розподілу освітленості в функції розсіювання; l - лінійний розмір пікселя вздовж рядку; $E(x)$ - залежність опромінення від координати x в функції розсіювання. Матричний приймач в межах кожного пікселя осереднює виміряні значення $E(x)$. При обмеженій кількості пікселів на які проектується зображення вигляд функції розсіювання буде спотворений. Така кількість відліків не дає можливості в подальшому рахувати складові ОПФ з необхідною точністю.

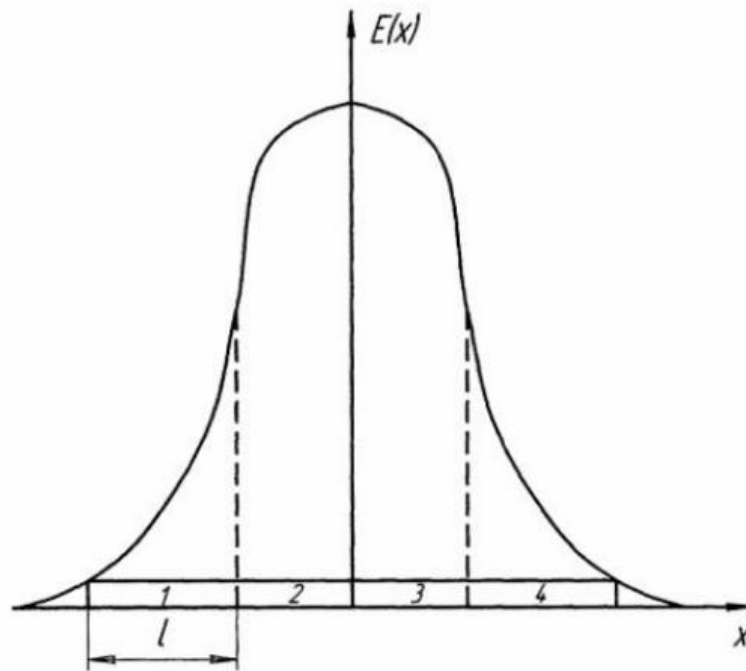


Рис. 2.8. Функція розсіювання проектується лише на 4 рядки пікселів матричного приймача

Для збільшення кількості відліків для того самого розподілу опроміненості $E(x)$ та сталого розміру 1 ЕОМ розраховує необхідний кут нахилу зображення функції розсіювання відносно стовпчиків матричного приймача. Внаслідок цього взаємне розташування зображення і площини матричного приймача буде мати вигляд приведений на рис. 2.7, де додатково зображені y - координата в напрямку стовпчиків матричного приймача, та h - лінійний розмір пікселя вздовж рядка матричного приймача. Кожний наступний рядок матричного приймача відтворює зображення ділянки функції розсіювання з зсувом, що дорівнює :

$$x_{\text{фр}} = h(\text{tg}\gamma)^{-1} \quad (2.12)$$

де γ - кут нахилу зображення функції розподілу відносно координати x .

Щоб отримати повну уяву про вигляд функції розсіювання використовується певна ділянка від a до b лінійного розміру матриці вздовж координати y . Ця ділянка обмежена розміром зображення функції розсіювання, яке залишається сталою вздовж координати y . Кількість пікселів, які

використовуються для визначення залежності $E(x)$ буде пропорційна площині взаємного перекриття зображенням функції розсіювання та елементів матриці. Враховуючу нерівномірність розподілу опроміненості по перерізу функції розсіювання у кожному наступному рядку на ділянці від a до b опромінення кожного пікселя вздовж рядку буде змінюватися згідно зміни координати певної точки функції розсіювання в напрямку цього рядку.

В подальшому ЕОМ за відповідною програмою робить зшивку отриманих даних вздовж певної кількості рядків та визначає складові ОПФ з необхідною точністю [13].

Ще одним прикладом є стенд функціональна схема якого зображена на рис. 2.5. Із рис. видно, що пристрій для контролю якості об'єктива містить в собі випромінювач (глобар) 1, конденсор 2, світлофільтри 3, тест-об'єкт 4, встановлений в фокальній площині коліматорного об'єктиву 5, об'єктив що контролюється 6, блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал 7, що містить мікроболометричну камеру 8, вихід якої підключено до першого входу електронно-обчислювальної машини 9, вихід ЕОМ підключено до контролеру 10, перший вихід котрого підключено до крокового двигуну 11, який підключено до мікроболометричної камери 8, що здійснює мікросканування в напрямку, перпендикулярному до зображення тест-об'єкта, а другий вихід контролеру підключено до другого входу ЕОМ.

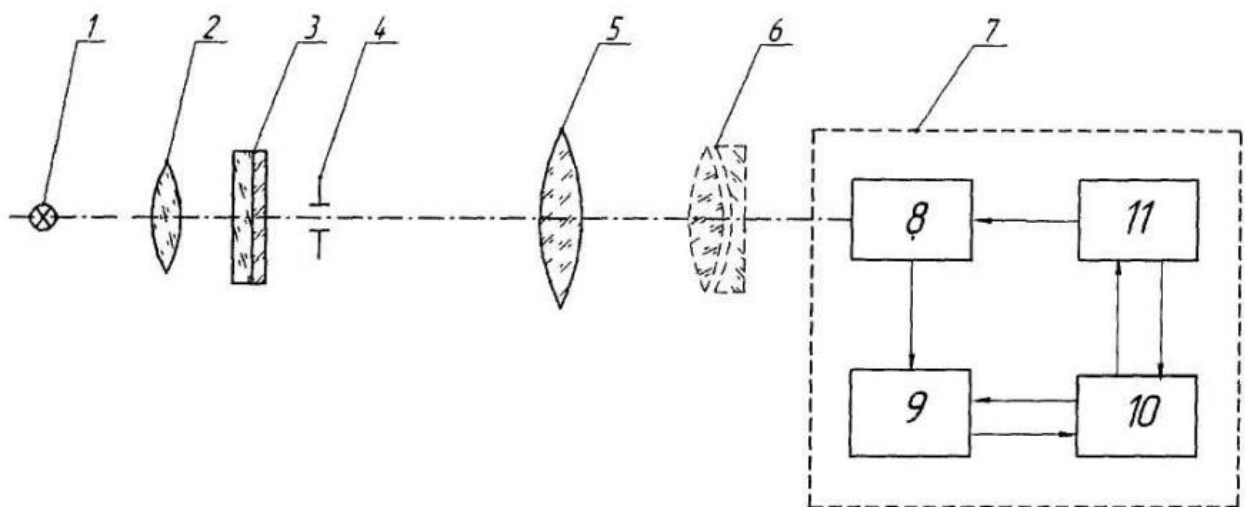


Рис. 2.9. Функціональна схема пристрою

Пристрій для контролю якості об'єктива працює наступним чином. Завдяки випромінювачу 1 через конденсор 2, світлофільтри 3 опромінюють тест-об'єкт 4, що являє собою регульовану по ширині прямокутну щілину. Коліматорним об'єктивом 5 проектується зображення тест-об'єкта на нескінченність. В паралельному ході променів за коліматорним об'єктивом встановлюють об'єкт, що контролюється 6, в фокальній площині якого отримується зображення щілини. В фокальній площині об'єктива, що контролюється встановлено блок аналізу та перетворення зображення в електричний сигнал 7, в якому містяться мікроболометрична камера 8, яка знімає дані вимірювання функції розсіювання та результати передаються на ЕОМ 9. За допомогою крокового двигуна 11 з контролером 10, фотоприймач 8 здійснює мікросканування в напрямку, перпендикулярному до зображення тест-об'єкта. З фотоприймача знімають отримані дані, які передаються на ЕОМ. ЕОМ здійснює дискретне перетворення Фур'є вхідної послідовності чисел, результатом якого є ОПФ об'єктива що контролюється. ЕОМ в залежності від розрахункової роздільної здатності об'єктива, що випробовується, визначає необхідну кількість кроків мікросканування площини зображення мікроболометричної камери, які характеризують розподілення випромінювання в функції розсіювання для обчислення складових ОПФ з потрібною точністю.

В даному пристрої під час вимірювання фотоприймач покроково зсувається на частину розміру чутливого елемента. Цей метод дозволяє збільшити частоту дискретизації у декілька разів. Тоді максимальна частота, яка може бути присутня в МПФ об'єктива, що досліджується, така, котра не вносить похибок у вимірювання, визначається формулою [17]:

$$\nu_{max} = \nu_n = \frac{\beta S}{2p} \quad (2.13)$$

де S - кількість зсувів

Покажемо, що це дійсно так. Дискретну вибірку значень освітленості в зображенні, котрі знімаються за допомогою матричного приймача можна представити у вигляді ґратки δ -функцій, вузли якої розташовані у центрах чутливих елементів і мають величину знятого з чутливого елемента сигналу q_n . Тоді послідовність, що описує сигнал з фотоприймача, запишеться як сума добутків значень сигналу та зсунутої δ -функції. А для покрокового мікросканування ми будемо мати декілька таких сум [17]:

$$Q(x) = \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta(x - np) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - \frac{p}{S}\right) + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - 2\frac{p}{S}\right) + \dots + \sum_{n=0}^{N-1} q_n \delta\left(x - np - (S-1)\frac{p}{S}\right) = \sum_{n=0}^{NS-1} q_n \delta\left(x - n\frac{p}{S}\right) \quad (2.14)$$

Тобто крок слідування δ -функцій у ґратці зменшується і відповідно збільшується частота дискретизації.

Над такою вибіркою можна здійснити дискретне перетворення Фур'є, що описується виразом [17]:

$$|\tilde{S}(v'_m)| = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} Q(n) \exp\left(\frac{-2\pi i n m}{N}\right), m = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.15)$$

Нормуючи таку послідовність відносно значення $\tilde{S}(0)$, можна отримати значення шуконої МПФ. Однак, слід зазначити, що значення сигналу q_n для кожного чутливого елемента є інтегрованим по площі цього елемента. Це спричиняє додаткову похибку в результуючому виразі нормованого Фур'є перетворення окрім похибки дискретизації. Таке інтегрування можна описати за допомогою згортки функції розподілу чутливості всередині одного елемента $h(x)$ з функцією розсіювання лінії $A(x)$. Тоді значення сигналу в центрі чутливого елемента з номером n буде дорівнювати:

$$q_n = h(np) \otimes A(np) \quad (2.16)$$

Таким чином дискретне перетворення Фур'є цієї послідовності дорівнюватиме добутку Фур'є перетворень цих двох функцій:

$$S(q_n) = S\{h(x)\} S\{A(x)\} \quad (2.17)$$

Фур'є перетворення функції $A(x)$ є шуканою МПФ об'єктиву, що досліджується, за яку можна прийняти отримані значення, якщо вплив функції $h(x)$ незначний, або ввести корегуючий коефіцієнт, що дорівнює:

$$K = \frac{1}{S\{h(x)\}} \quad (2.18)$$

Тоді добуток $S(q_n)K$ і буде шуканою МПФ [17].

Функція розподілу чутливості в середині одного елементу в найпростішому випадку з точністю до постійного коефіцієнту може бути представлена прямокутною функцією. А її Фур'є перетворення визначається sinc-функцією. Графік цієї функції приведено на рис. 2.10. Як видно з графіка в точках $\nu = \frac{\beta}{p}k, k \in Z$ функція $\text{sinc}(\nu)$ набуває нульового значення, що призводить до різкого наростання коефіцієнту $K(\nu) = \frac{1}{\text{sinc}(\frac{\nu p}{\beta})}$ в околі цих точок і, якщо вводиться корегуючий коефіцієнт, то слід виключити такі точки з корекції.

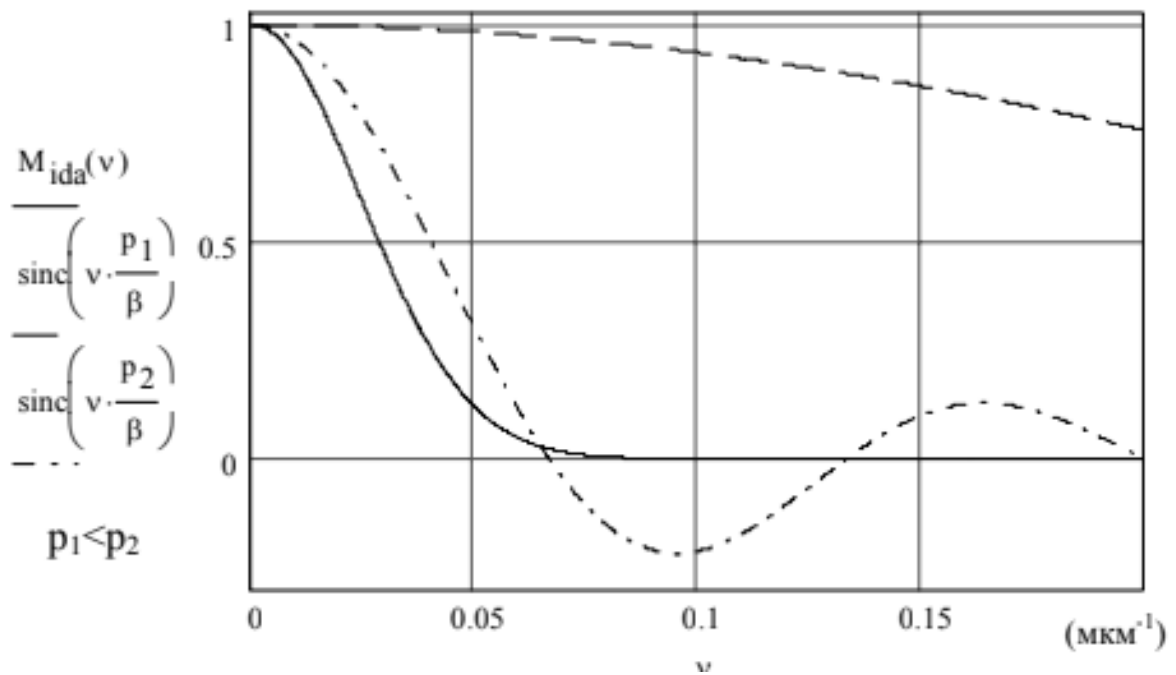


Рис. 2.10. Спектри функції чутливості одного елементу для двох різних розмірів чутливих елементів у порівнянні з МПФ об'єктиву, що досліджується

З формули (2.13) можна знайти кількість зсувів, котрі необхідно здійснити для того, щоб стэнд розділяв частоту ν_{max} :

$$C = \text{round} \left(\frac{\nu_{max} 2p}{\beta} \right) \quad (2.19)$$

де $\text{round}(x)$ – функція, що відкидає дробову частину x .

Як відомо МПФ абераційного об'єктиву не перевищує МПФ дифракційно обмеженого. Для дифракційно обмеженого об'єктиву ФР можна апроксимувати функцією Гауса з врахуванням радіусу кружка Ері, що можна врахувати і при одномірному моделюванні. Відповідно можна знайти й МПФ цієї апроксимації у аналітичному вигляді. Таким чином, врахувавши вирази для апроксимацій ФР та МПФ дифракційно обмеженого об'єктиву, можна записати остаточний вираз для максимальної частоти, що може бути присутня в спектрі ФР:

$$v_{max} = 1,1 \frac{D/f}{\lambda} \quad (2.20)$$

Підставляючи отримане значення у формулу (2.19) для визначення мінімально необхідної кількості кроків отримаємо:

$$C = round \left(1,1 \frac{D/f}{\lambda} \frac{2p}{\beta} \right) \quad (2.21)$$

Обмеження по кількості елементів спричиняє дискретність відліків ОПФ з періодом $1/Np$. Однак при недостатньо великій виборці легко збільшити кількість елементів, доповнивши вибірку елементами з нульовими відліками, що дозволяє звести нанівець цей тип похибки.

Перевагою цих методів є відсутність потреби в використанні інфрачервоних еталонних мікрооб'єктів, розробка яких є складною технічною задачею [17].

Висновки до другого розділу

Для визначення характеристик якості зображення можуть використовуватись стенди побудовані на наступних принципах: з механічним скануванням зображення одноелементним фотоприймачем; з використанням ЛППЗ; з використанням матричних приймачів.

Недолік першої схеми полягає в необхідності розробки високоточного механічного приводу для пересування фотоприймача і неможливості отримання результату в реальному масштабі часу. Це особливо важливо коли контроль якості зображення проводиться під час юстування об'єктива.

ЛППЗ використовується для контролю якості зображення об'єктивів що працюють в видимому діапазоні спектра. Проведене комп'ютерне моделювання дозволило отримати результати, що дозволяють визначити необхідне значення збільшення мікрооб'єктиву β у вузлі фотометрирування стенду вимірювання МПФ, а також визначити припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дають можливість зменшити похибку вимірювання МПФ. Припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дозволяють зменшити похибку визначення МПФ, не повинні перевищувати 0,01 максимального нормованого значення ФРЛ, позаяк надалі похибка визначення МПФ починає суттєво зростати. Із збільшенням рівня обмеження максимум похибки визначення МПФ зсувається в бік більш високих просторових частот. За допомогою обмеження рівня вихідного сигналу найбільш суттєво можна компенсувати похибку визначення МПФ в зоні середніх і високих просторових частот.

Для контролю якості зобр ІЧ об'єктива замість еталонного мікрооб'єктива який складно виготовити в цьому спектральному діапазоні краще скористатися або поворотом зображення щільної діафрагми відносно вертикалі або методом мікросканування. Необхідне значення кута повороту або кроків мікросканування визначають в залежності від розмірів пікселя матричного приймача і допустимої похибки вимірювань.

Розділ. 3. Похибки конструктивних параметрів стендів вимірювання ОПФ

3.1. Вплив параметрів щілинної діафрагми на похибку вимірювання ОПФ

Розробка стендів для визначення ОПФ об'єктів є актуальною задачею, оскільки ОПФ найбільш інформативно і повно характеризує якість об'єктів. Методиці проектування таких стендів присвячено ряд публікацій [14],[16],[17]. Математично ОПФ є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. При вимірюванні ОПФ за допомогою лінійного приладу з переносом заряду (ЛППЗ) використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [16]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\left(\frac{-j2\pi mk}{N}\right) \quad (3.1)$$

де T -період дискретизації значень ФРЛ;

$S_{x'k}$ - нормоване значення ФРЛ;

$k = 0,1,2 \dots N - 1$ – номер відліку у масиві ФРЛ;

$m = 0,1,2 \dots$ - номер дискретного значення просторової частоти;

x' - лінійна координата в площині зображення;

v' - просторова частота в площині зображення.

З урахуванням (1) та формули Ейлера МПФ, як модуль ОПФ дорівнює:

$$\tilde{S}(v'_m) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2}. \quad (3.2)$$

Якщо в якості тест-об'єкта використовується щілинної діафрагма з розподілом яскравості в залежності від поперечної координати $L(x)$, то спектр цієї функції з урахуванням перетворення Фур'є має наступний вигляд:

$$\tilde{L}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-2\pi v x} dx. \quad (3.3)$$

Теоретично закон розподілу яскравості може бути представлений наступним співвідношенням:

$$L(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

В цьому випадку функція $L(x)$ має назву дельта-функції і, враховуючи можливість розкладання $e^{-j2\pi v x}$ з використанням формули Ейлера, можна дійти висновку, що модуль оптичної передавальної функції міститиме косинус-гармоніки $\cos(2\pi v x)$, значення яких при $x = 0$ дорівнюють одиниці для усіх просторових частот.

В ході проектування стенду для вимірювання МПФ виникає потреба з енергетичних міркувань збільшувати ширину щілинної діафрагми, що призводить до того що МПФ тест-об'єкта при збільшенні просторової частоти поступово зменшується і може бути визначена за співвідношенням:

$$\begin{aligned} L(v) &= \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-j2\pi v x} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{b} e^{-j2\pi v x} dx = \frac{1}{b} \frac{e^{-j2\pi v b} - e^{j2\pi v b}}{-j2\pi v} \\ &= \frac{\sin(\pi v b)}{\pi v b}, \end{aligned} \quad ((3.5))$$

де b -ширина щілинної діафрагми в площині коліматора.

В площині фотоприймача ширина зображення щілинної діафрагми дорівнює:

$$b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} b, \quad (3.6)$$

де $f'_{кол}$ – фокусна відстань об'єктива коліматора;

$f'_{об}$ – фокусна відстань досліджуваного об'єктива.

Для безпосереднього знаходження МПФ за експериментальними даними необхідно провести коригування на спектр тест - об'єкта. Для забезпечення лінійного переходу від вимірних до розрахункових величин необхідно забезпечити умову, за якої значення $f(v) = \frac{1}{\tilde{L}(v)} = \frac{\pi v b}{\sin \pi v b}$ не перевищували б 1.05, тобто 5% від величини експериментальних даних. Це коригування треба проводити згідно співвідношення:

$$\tilde{S}(v') = \tilde{E}(v) \times f(v), \quad (3.7)$$

де $\tilde{S}(v')$ – МПФ випробуваного об'єктива;

$\tilde{E}(v)$ – МПФ випробуваного об'єктива виміряна безпосередньо при експерименті;

$f(v)$ – коригуючий коефіцієнт.

При збільшенні ширини щілинної діафрагми залежність $f(v)$ стає нелінійною, що буде приводити до сильних спотворень отриманих експериментальних даних. Інструментальна похибка установки ширини щілинної діафрагми Δb приймається рівною половині ціни поділки приладу. В подібних стендах використовується щілинної діафрагма з мікрометричним механізмом, що має інструментальну похибку 0,5 мкм. Вимірювання ми проводимо в площині зображення, тому значення Δb також необхідно перевести в площину зображення згідно формули:

$$\Delta b' = \frac{f'_{об}}{f'_{кол}} \Delta b. \quad (3.8)$$

Таким чином абсолютна похибка коригуючого коефіцієнта враховуючи (5) дорівнює :

$$\begin{aligned} \Delta f(\nu) &= \frac{\pi \nu \sin \pi \nu b - \pi^2 \nu^2 b \cos \pi \nu b}{\sin^2 \pi \nu b} \Delta b' \\ &= \left(\frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b} - \frac{\pi^2 \nu^2 b^2}{\sin \pi \nu b} \times \cos \pi \nu b \right) \frac{\Delta b'}{b} \\ &= (f(\nu) - f^2(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта дорівнює:

$$\frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)} = (1 - f(\nu) \cos \pi \nu b) \frac{\Delta b'}{b} = (1 - \frac{\pi \nu b}{\sin \pi \nu b}) \frac{\Delta b'}{b}. \quad (3.10)$$

Похибка вимірювання ширини щілинної діафрагми вносить додаткову похибку в визначення МПФ досліджуваного об'єкта:

$$\Delta \tilde{S}(\nu'_m) = \tilde{E}(\nu) \times \Delta f(\nu) + \Delta \tilde{E}(\nu) f(\nu) = \tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu). \quad (3.11)$$

В даному випадку ми враховуємо тільки один фактор похибок, тому приймаємо $\Delta \tilde{E}(\nu) = 0$. В результаті отримуємо:

$$\frac{\Delta \tilde{S}(\nu'_m)}{\tilde{S}(\nu'_m)} = \frac{\tilde{E}(\nu) \Delta f(\nu)}{\tilde{E}(\nu) f(\nu)} = \frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)}. \quad (3.12)$$

Підставивши в (3.5) значення ширини щілинної діафрагми $b' = 1; 2; 3; 0,25$ мкм в діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ отримаємо залежності коригуючого коефіцієнта від просторової частоти, що показано на рис.3.1.

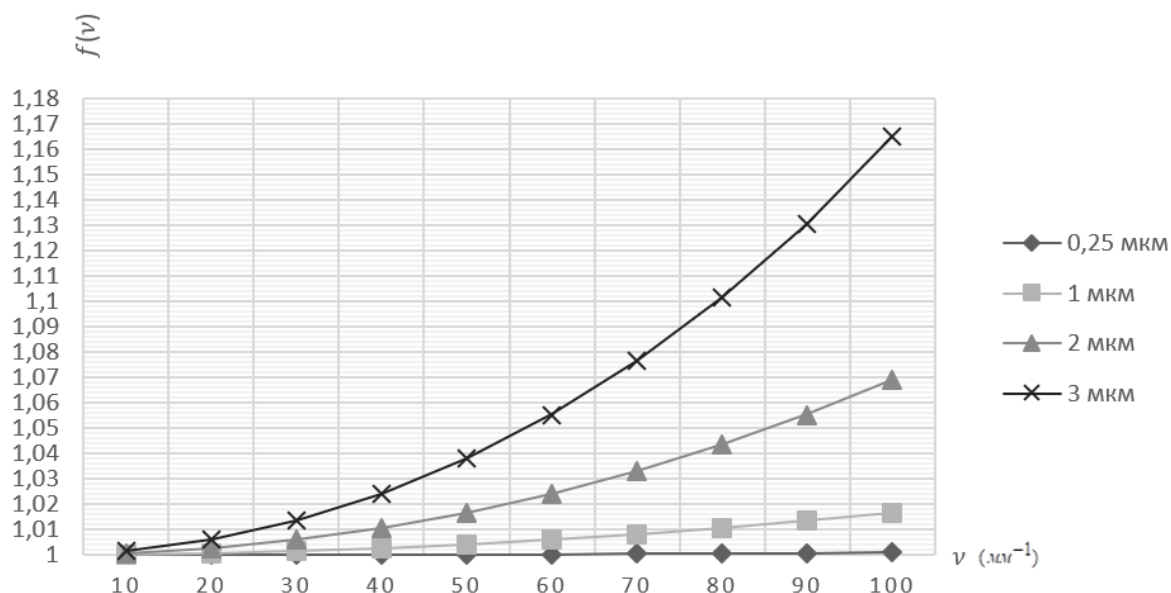


Рис. 3.1. Значення коригуючого коефіцієнта

З графіка видно, що в діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$ зберігається нерівність $f(\nu) \leq 1,05$ при розмірах зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} = 0,25 \dots 3 \text{ мм}$. В діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ ця нерівність виконується тільки при ширині щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} \leq 2 \text{ мм}$. Тому розмір зображення щілинної діафрагми не повинен перевищувати $1 \dots 2 \text{ мм}$. Цей розмір в фокальній площині коліматора може бути збільшений пропорційно співвідношенню $f'_{\text{кол}}/f'_{\text{об}}$.

При визначенні впливу похибки установки ширини щілинної діафрагми на точність визначення МПФ враховуємо що вимірювання ми проводимо в площині зображення. Тому значення $\Delta b_{\text{щіл}}$ також необхідно перевести в площину зображення. Якщо, наприклад, досліджується об'єктив з фокусною відстанню 150 мм, а фокусна відстань коліматорного об'єктива 500 мм, то отримаємо:

$$\Delta b_{\text{зобр}} = \frac{f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} \Delta b_{\text{щіл}} = \frac{150}{500} \cdot 0,5 \text{ мм} = 0,15 \text{ мм} \quad (3.13)$$

Відносна похибка коригуючого коефіцієнта визначається із співвідношення (3.10) і, враховуючи (3.12), вона дорівнює відносній похибці

визначення МПФ досліджуваного об'єктива. Значення відносної похибки для трьох розмірів зображення щілинної діафрагми $b'=1;2;3;0,25$ мкм в діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ приведені на рис. 3.2.

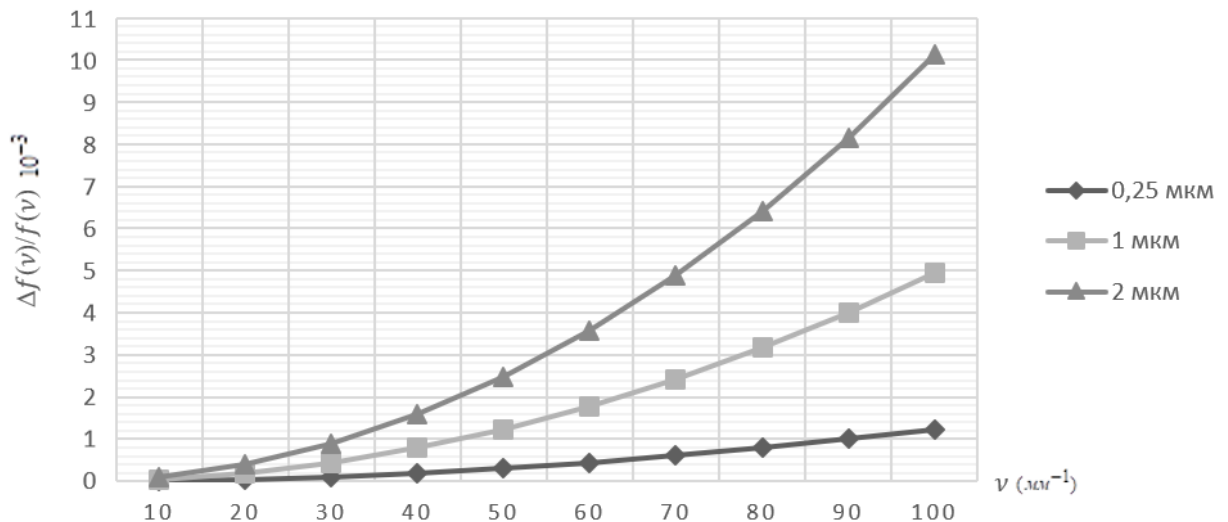


Рис. 3.2. Відносна похибка коригуючого коефіцієнта

Ця похибка є нелінійною залежністю від ν для прийнятих в дослідженні розмірах щілинної діафрагми. Але вклад цієї похибки в результат вимірювання МПФ досліджуваного об'єктива є величиною 2-го порядку малості по відношенню до похибки обумовленої шириною щілини.

Наприклад, при ширині щілини $b = 1 \text{ мкм}$ на просторовій частоті $\nu = 100 \text{ мм}^{-1}$ відносна похибка вимірювання МПФ дорівнює:

$$\frac{\Delta f(\nu)}{f(\nu)} = \frac{\Delta \tilde{S}(\nu'_m)}{\tilde{S}(\nu'_m)} (\nu = 100 \text{ мм}^{-1}) = 4,96 \cdot 10^{-3} \quad (3.14)$$

Ширина щілинної діафрагми в стенді вимірювання МПФ об'єктивів повинна враховуватись для визначення МПФ з допустимою похибкою 5%. В залежності від того, який діапазон просторових частот використовується при проведенні досліджень, а також від конструктивних параметрів вимірювального стенда розмір цієї діафрагми може бути визначений з урахуванням розміру її

зображення в площині фото приймального пристрою. Якщо діапазон просторових частот обмежений інтервалом $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$ зберігається нерівність $f(\nu) \leq 1,05$ при розмірах зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} = 0,25 \dots 3 \text{ мм}$. В діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} \leq 2 \text{ мм}$.

3.2. Визначення вимог до позиціонування інфрачервоних об'єктів при вимірюванні МПФ

Стрімкий розвиток та застосування інфрачервоних (ІЧ) оптичних систем у вимірювальній, навігаційній, аграрній, військовій та авіаційно-космічній техніці для отримання точної та детальної інформації про об'єкт спостереження супроводжується проблемою передачі високоякісного зображення через оптичну систему (ОС) в цій спектральній області. Такі системи передбачають використання об'єktivів з високою, майже дифракційною, якістю зображення. Для контролю якості зображення об'єктива використовують атестаційні стенди. Принцип дії сучасних стендів побудований на вимірюванні функції розсіювання об'єктива з подальшим застосуванням перетворення Фур'є для визначення МПФ. МПФ універсальний критерій, який повністю характеризує якість ОС. Вона показує, як ОС відтворює різні просторові частоти. Міжнародна організація по стандартизації (International Organization for Standardization - ISO) прийняла його як основний для оцінки якості ОС.

Вимірювання МПФ треба проводити в фокальній площині об'єктива, який випробується. Внаслідок похибок конструктивних параметрів задній фокальний відрізок об'єктива має відхилення від розрахункового значення в межах 3-4%. Це приводить до похибки вимірювання МПФ. Тому в конструкції вимірювального стенда передбачені пристрої ручного або автоматичного фокусування об'єктива в площину предметів фотоприймального пристрою. В роботі поставлене завдання визначити які вимоги слід встановити до пристроїв ручного або автоматичного фокусування при базуванні типових ІЧ об'єktivів в стенд для вимірювання МПФ, щоб похибка її визначення не перевищувала 5%.

Принцип вимірювання заснований на використанні коліматорної установки з неперіодичним тест-об'єктом для експериментального визначення функції розсіювання лінії (ФРЛ) об'єктів, що випробуються. [18]. По результатах декількох вимірювань осереднені значення ФРЛ надходять до комп'ютера, який за певною програмою визначає середні значення МПФ. Для досліджень були використані типові схеми ІЧ об'єктів з різними значеннями фокусних відстаней, діаметрів входної зіниці та кутів поля зору. Похибка, вплив якої аналізується, стосується вимог до чутливості пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктів, при якій похибка вимірювання МПФ буде знаходитись в межах 5%.

Схема вимірювального стенда приведена на рис. 3.3 [18]. Вимірювання засноване на тому, що потік випромінювання від джерела випромінювання 1 ІЧ діапазону спектру конденсором 2 через світлофільтр 3, що виділяє ділянку спектра необхідного спектрального діапазону, направляється на тест-об'єкт щілину 4, яка розташована у фокальній площині коліматорного об'єктива 5. Випробувальний об'єктив 6 розташований у паралельному пучку променів та встановлений на автоматизований привід 7, який керується через контролер 8 комп'ютером 11. Зображення тест-об'єкта проектується об'єктивом 6 в площину фокусування фотоприймального пристрою, який містить еталонний мікрооб'єктив і мікробалометричну матрицю 9. Сигнал з матриці обробляється мікропроцесором 10, вводиться у комп'ютер 11, який з використанням перетворення Фур'є по заданому алгоритму розраховує значення МПФ випробувального об'єктива.

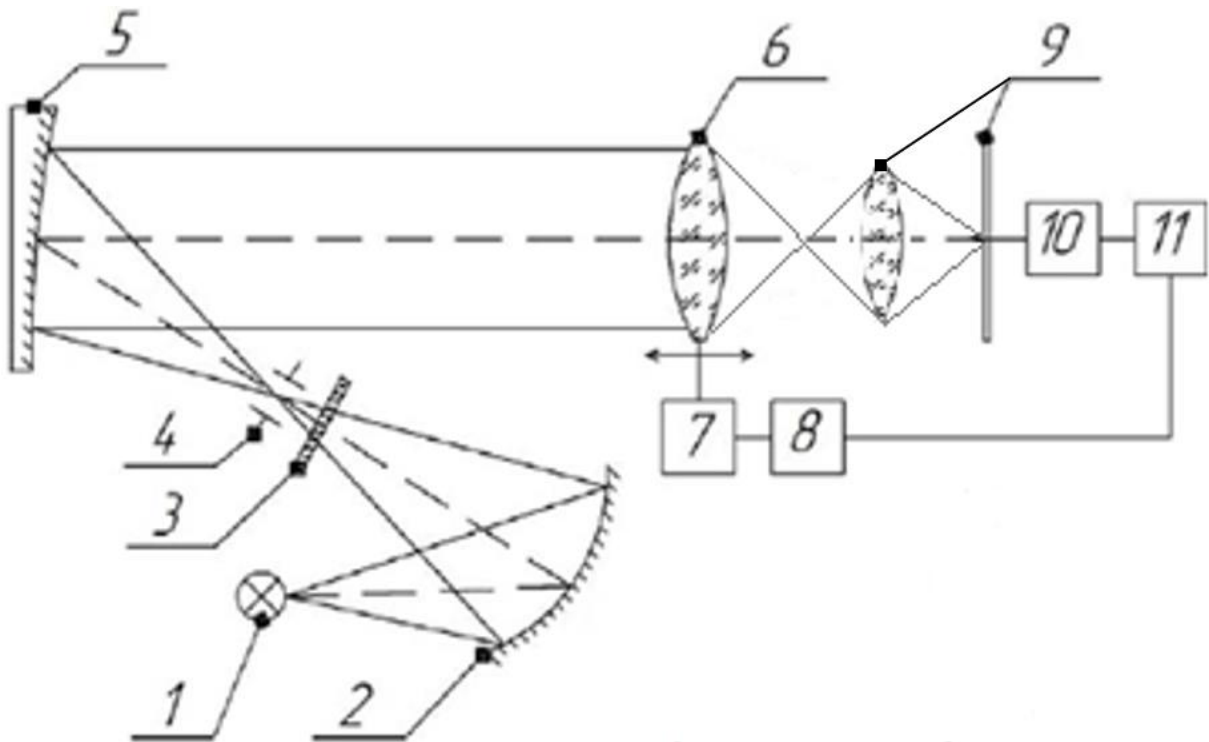


Рис. 3.3. Схема стенду для вимірювання МПФ інфрачервоних об'єтивів

Математично оптична передавальна функція (ОПФ), складовою якої є МПФ є Фур'є-перетворенням від функції розсіювання крапки або лінії. При визначенні ФРЛ за допомогою матричного приймача використовується дискретне Фур'є-перетворення згідно співвідношення [18]:

$$\tilde{S}(v'_m) = T \sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \exp\left\{\frac{-j2\pi mk}{N}\right\}, \quad (3.15)$$

де: T – період дискретизації значень ФРЛ;

$S_{x'k}$ – нормоване значення ФРЛ;

$k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ – номер відліку у масиві ФРЛ;

$m = 0, 1, 2, \dots$ – номер дискретного значення просторової частоти;

x' – лінійна координата в площині зображення.

З урахуванням (3.15) та формули Ейлера МПФ, як модуль ОПФ дорівнює:

$$\tilde{S}(v'_m) = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \cos\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k} \sin\left(\frac{2\pi mk}{N}\right)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_{x'k}}\right)^2}. \quad (3.16)$$

Якщо площа вимірювання МПФ зсунута по відношенню до фокальної площини ІЧ об'єктива на величину Δ то значення МПФ відрізняється від розрахункового і визначається із співвідношення [19]:

$$\begin{aligned} \tilde{S}(R, \Delta) = & \frac{4}{\pi a} \cos aR \left\{ \theta J_1(a) - \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n} \sin(2n\theta) \cdot [J_{2n-1}(a) - J_{2n+1}(a)] \right\} - \\ & - \frac{4}{\pi a} \sin aR \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \sin[(2n+1)\theta] \cdot [J_{2n}(a) - J_{2n+2}(a)], \end{aligned} \quad (3.17)$$

де $R = \nu \lambda K$ – просторова частота у відносних одиницях;

Δ – розфокусування;

ν – просторова частота в лініях на мм;

λ – робоча довжина хвилі об'єктива;

$K = \frac{f'}{D}$ – діафрагмене число;

$a = \frac{\pi R \Delta}{\lambda K^2},$

$\theta = \arccos R,$

$J_n(a)$ - функції Бесселя n -го порядку.

Співвідношення (3.17) було використано при проведенні математичного моделювання для визначення вимог до точності пристроїв ручного або автоматичного фокусування ІЧ об'єктивів в стенді вимірювання МПФ.

Моделювання проводилось для типових схем ІЧ об'єктивів. Для прикладу параметри конструктивні параметри трьох схем ІЧ об'єктивів [20],[21],[22], які працюють в діапазоні довжин хвиль $8 \div 12$ мкм приведені в табл. 1÷3

Таблиця 3.1 Конструктивні параметри об'єктива №1

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	56,4	6,59	Ge
R2	85,0	5,42	
R3	-23,0	3,59	-
R4	-26,658	43,32	Ge
R5	23,0	7,15	-
R6	27,0	8,19	Ge
R7	∞	1,0	-
R8	∞	2,366	Ge
$f' = 36,98$ мм, діафрагмове число $K = 1:1,24$, поле зору $2\omega = 12^\circ$			

Таблиця 3.2 Конструктивні параметри об'єктива № 2

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	55,56	6,59	IKC25
R2	158,63	5,42	
R3	505,84	3,59	-
R4	92,63	43,32	ZnSe
R5	20,65	7,15	-
R6	21,41	8,19	IKC25
$f' = 50,1$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 12^\circ$			

Таблиця 3.3 Конструктивні параметри об'єктива №3

Номер поверхні	Радіус кривизни, мм	Товщина по осі, мм	Матеріал
R1	90,92	10,54	IKC25
R2	291,28	8,88	
R3	1017,81	6,13	-
R4	151,95	71,90	ZnSe
R5	30,92	5,55	-
R6	31,17	13,89	Ge
$f' = 85,77$ мм, діафрагмове число $K = 1:1$, поле зору $2\omega = 8^\circ$			

Моделювання проводилося з використанням програми ZEMAX. До уваги приймалися залежності, при яких зсув Δ площини вимірювання МПФ спричиняв появу похибки її вимірювання в межах $\pm 5\%$. На рис. 2÷4 представлені графіки МПФ при розрахунковому положенні фокальної площини об'єктивів 1÷3 і при її зсувах, що спричиняють похибку вимірювання МПФ в межах 5%.

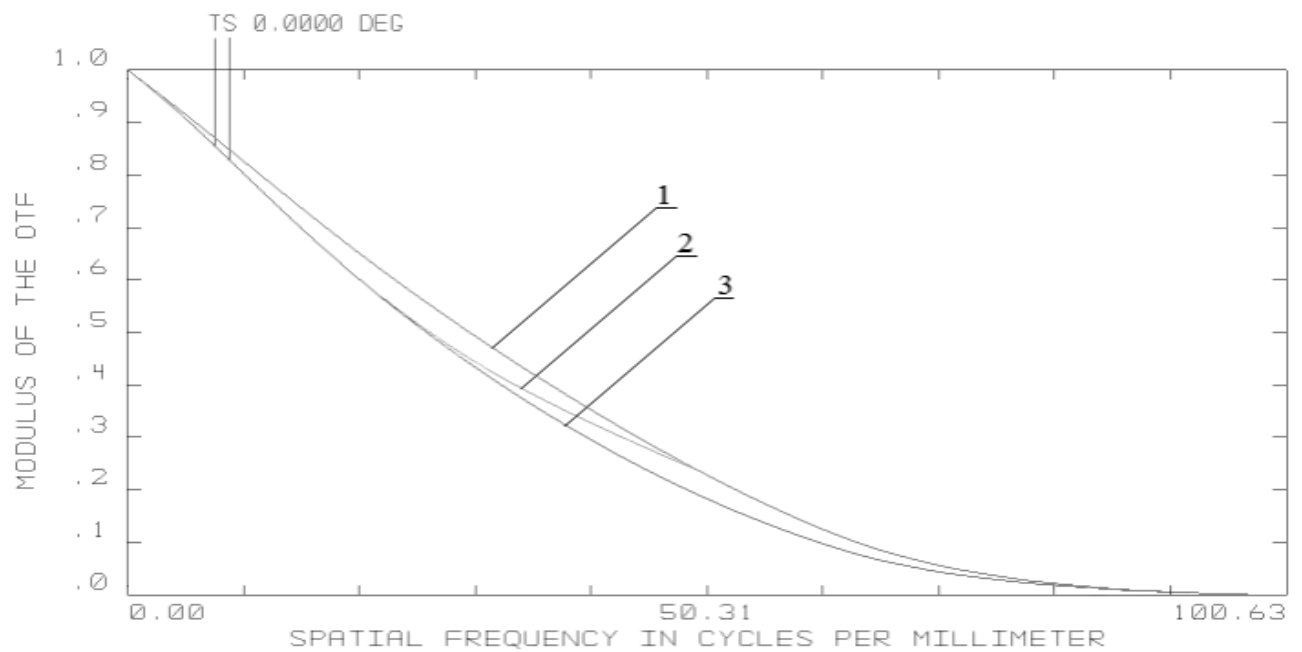


Рис. 3.4 Графік МПФ об'єктива 1 :

- 1 – розрахункове положення фокального відрізка,
- 2 – зменшення фокального відрізка на 0.009мм,
- 3 – збільшення фокального відрізка на 0.007мм;

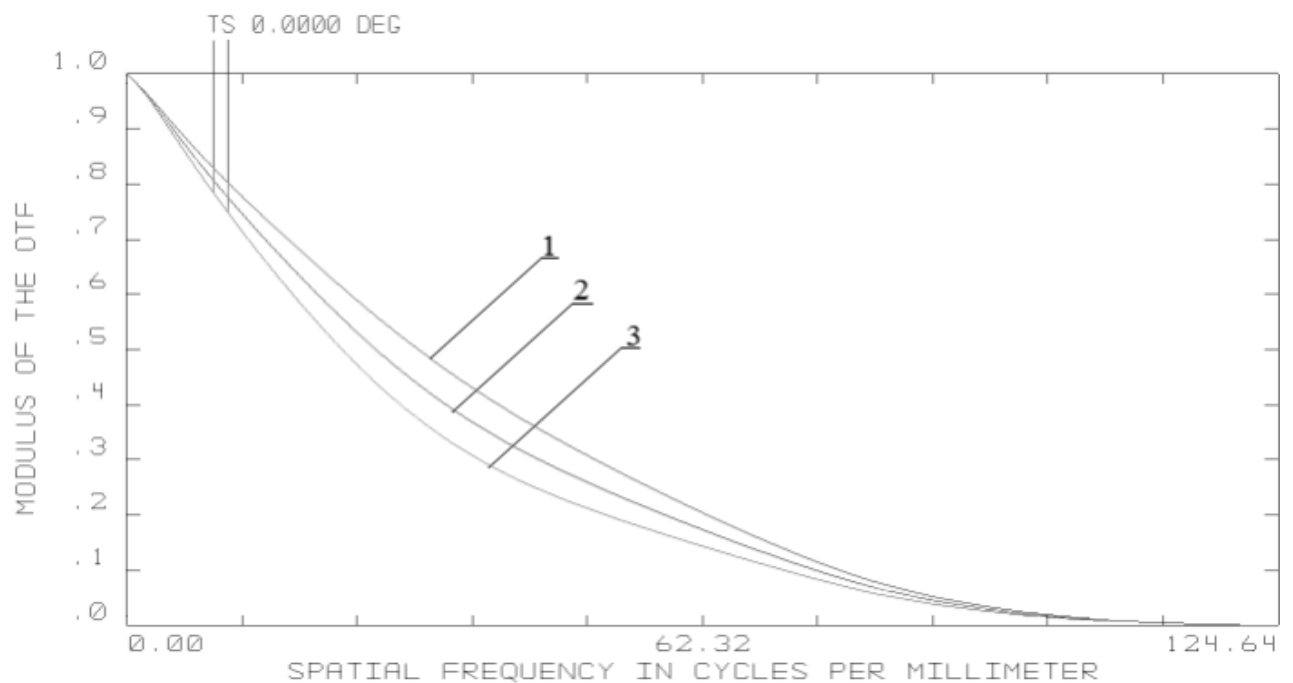


Рис. 3.5 Графік МПФ об'єктива 2 :

- 1 – розрахункове положення фокального відрізка,
- 2 – зменшення фокального відрізка на 0.019мм,
- 3 – збільшення фокального відрізка на 0.016мм ;

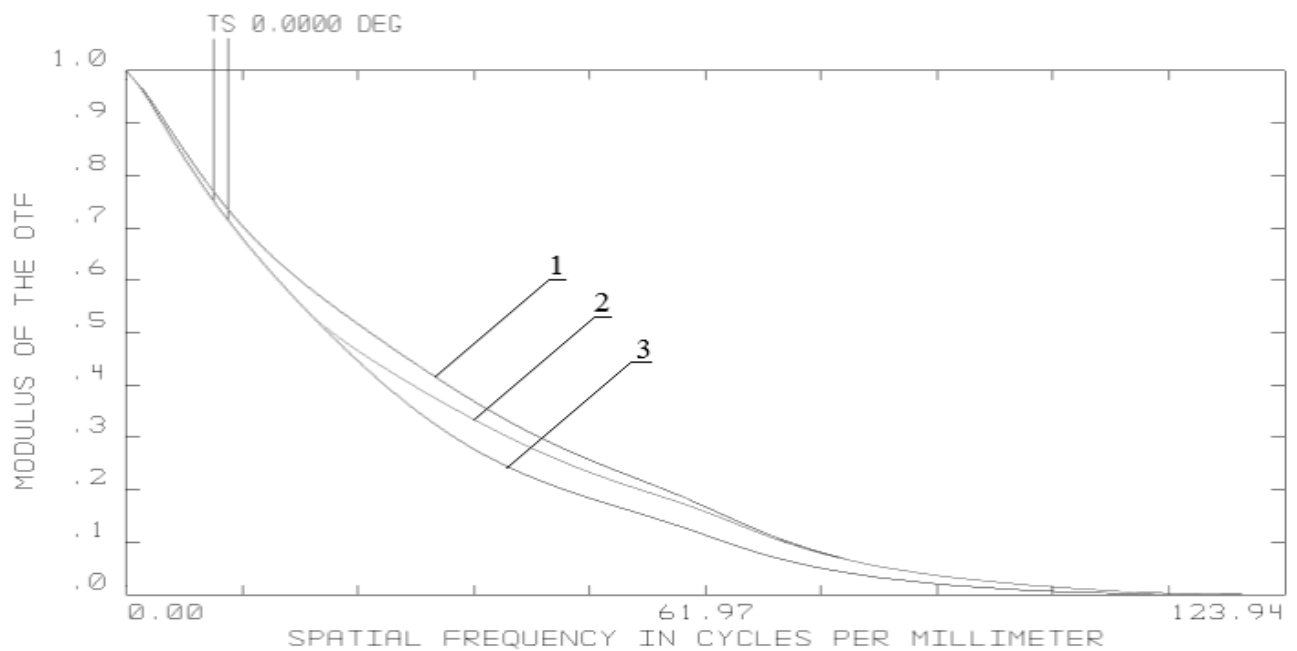


Рис. 3.6 Графік МПФ об'єктива 3 :

- 1 – розрахункове положення фокальної площини,
- 2 – зменшення фокального відрізка на 0.026мм,
- 3 – збільшення фокального відрізка на 0.018мм.

Математичне моделювання показало наступне:

- існують певні вимоги до пристроїв позиціювання ІЧ об'єктивів в стенді для вимірювання МПФ, що обумовлюють точність вимірювання в межах 5%;
- з зменшенням фокального відрізка об'єктива точність пристроїв позиціювання повинна бути підвищена;
- вимоги до пристроїв позиціювання в разі збільшення фокального відрізка жорсткіші і знаходяться в межах 7÷18мкм;
- вимоги до пристроїв позиціювання в разі зменшення фокального відрізка знаходяться в межах 9÷26мкм.

Математичне моделювання показало, що похибка пристроїв позиціювання для забезпечення похибки вимірювання МПФ в межах 5% повинна не перебільшувати 7÷9мкм.

3.3. Оцінка впливу коліматорного об'єктива стенда вимірювання ОПФ на якість зображення

Одним з основних вузлів стендів вимірювання ОПФ є коліматорний об'єктив. Важливо щоб якість цього об'єктива не спотворювала результати вимірювання ОПФ об'єктива який досліджується. В більшості стендів коліматор будується за схемою Гершеля.

Система Гершеля складається з двох дзеркал плоского, яке безаберацийне, та головного. Задача полягає в тому, щоб вибрати головне дзеркало. Для цього порівняємо сферичне та параболічне дзеркала. Введемо конструктивні параметри дзеркал в програму ZEMAX. Направивши паралельний пучок променів на два варіанти дзеркал. Якість зображення оцінимо по розмірам плями розсіювання в фокальній площині дзеркал.

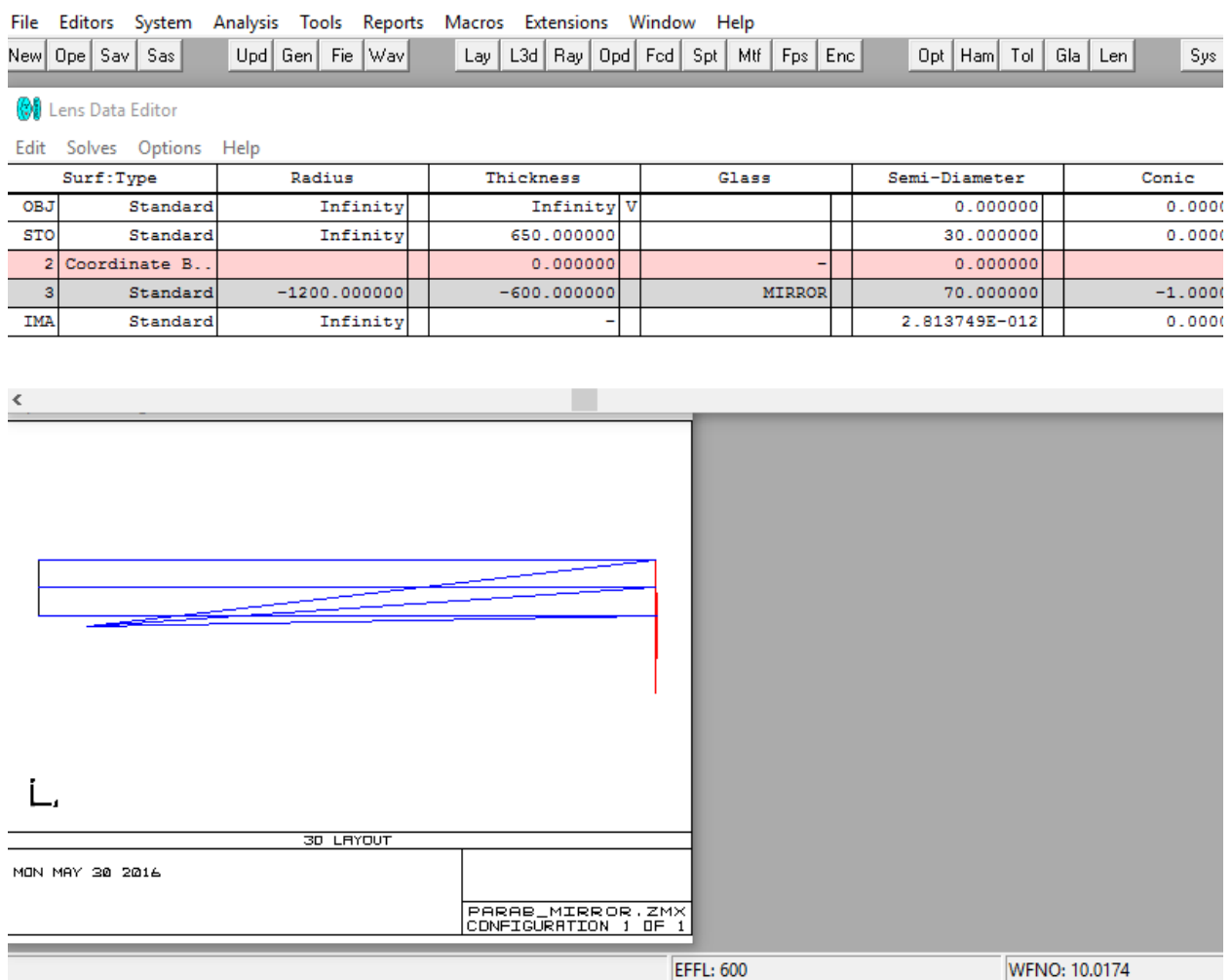


Рис. 3.6. Конструктивні параметри в Zemax.

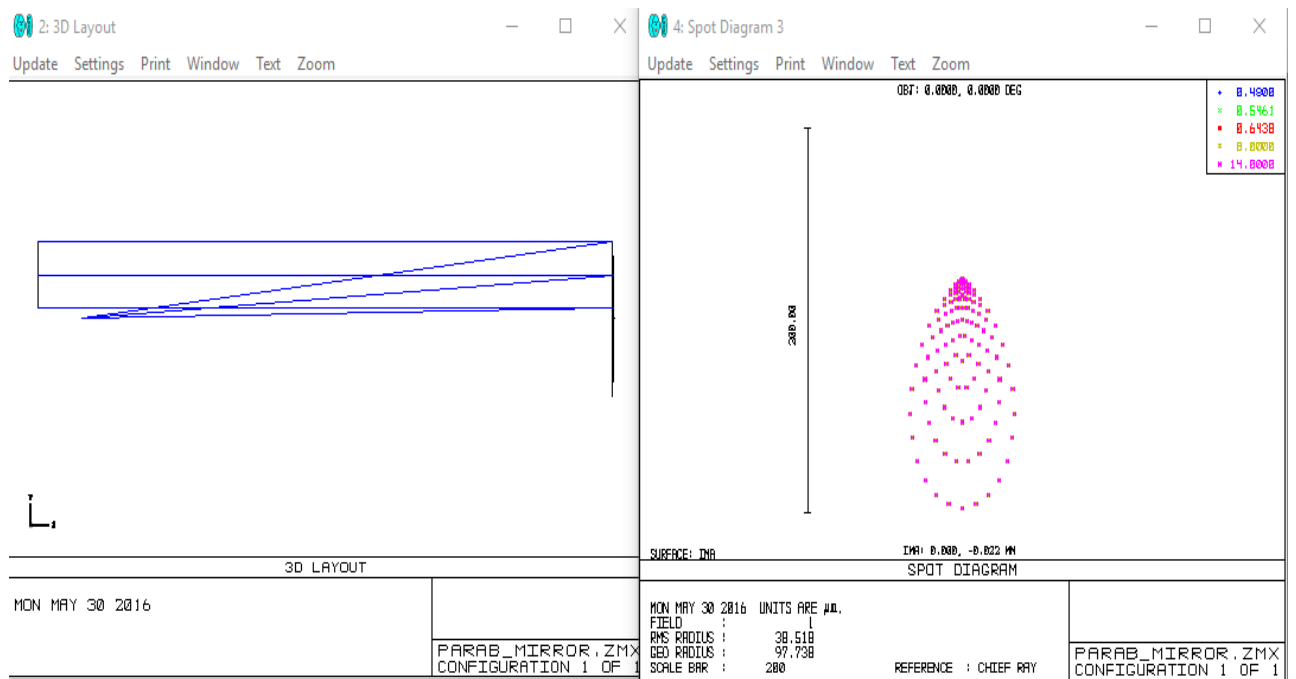


Рис. 3.7. Spot Diagram сферичного дзеркала (розмір плями 200нм).

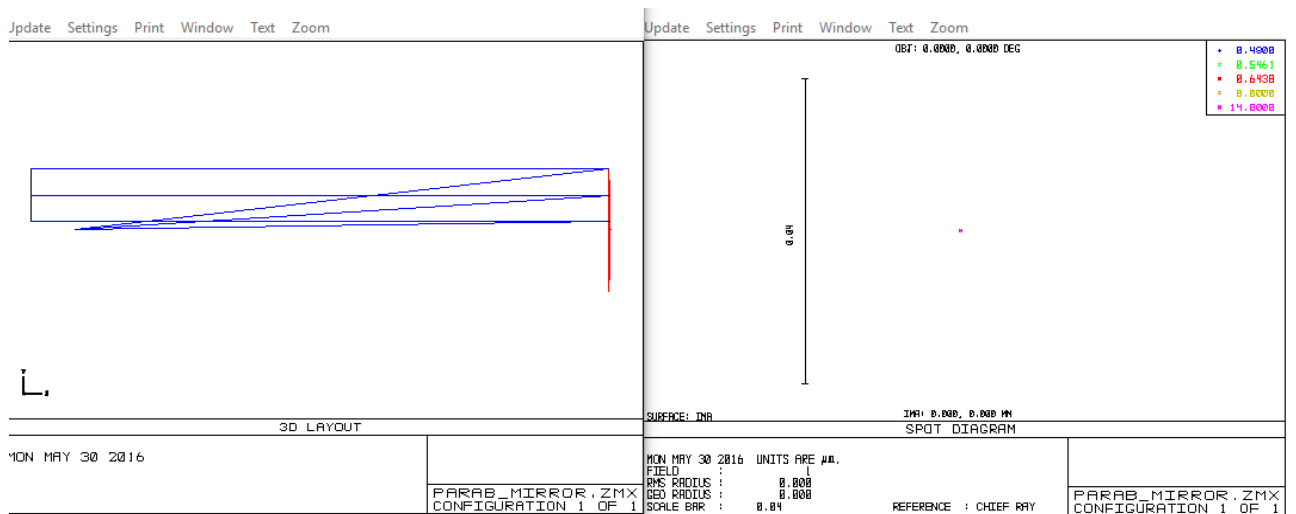


Рис. 3.8. Spot Diagram параболічного дзеркала (розмір плями 0,04 нм).

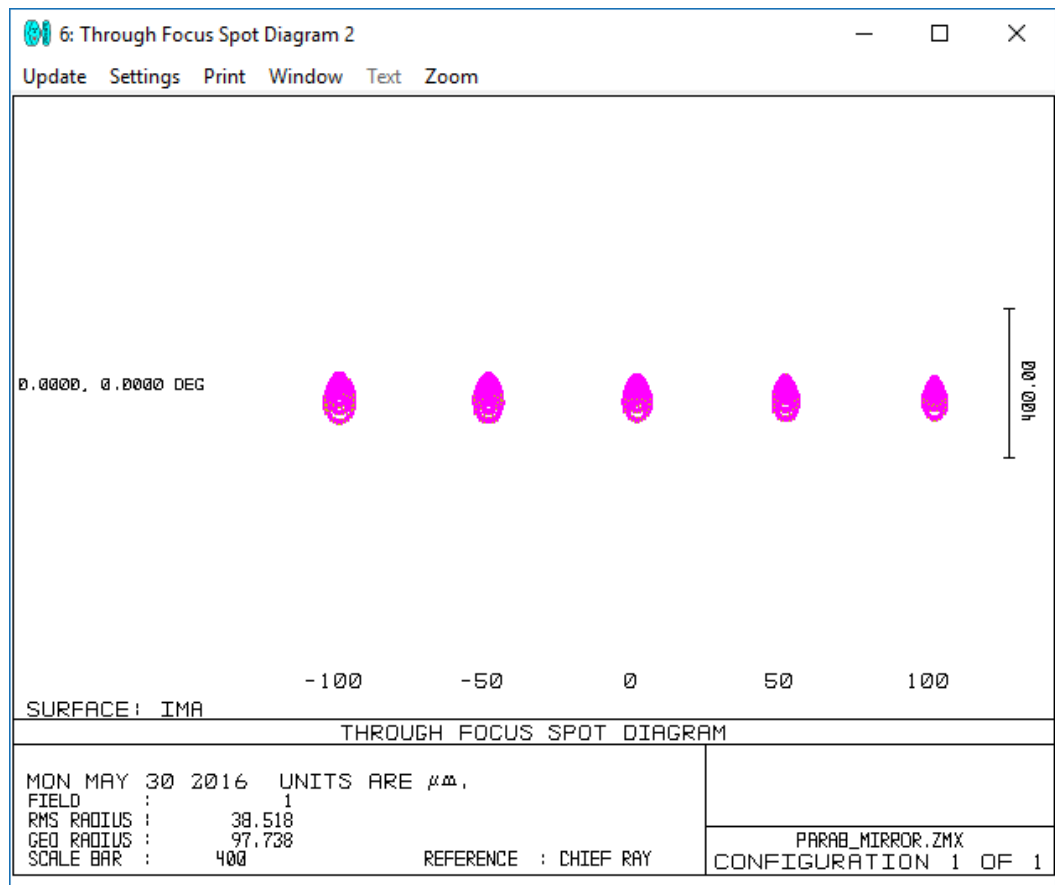


Рис. 3.9. Фокусна Spot Diagram сферичного дзеркала (400 nm).

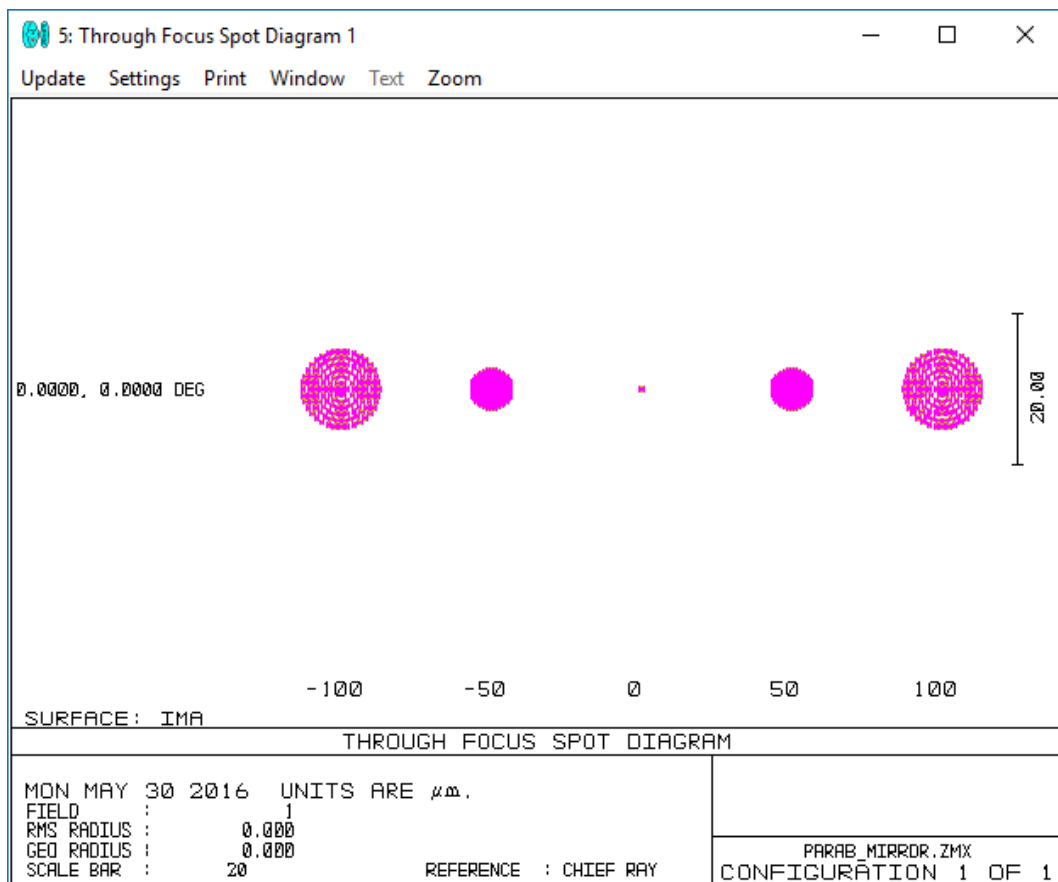


Рис. 3.10. Фокусна Spot Diagram параболічного дзеркала (20 nm).

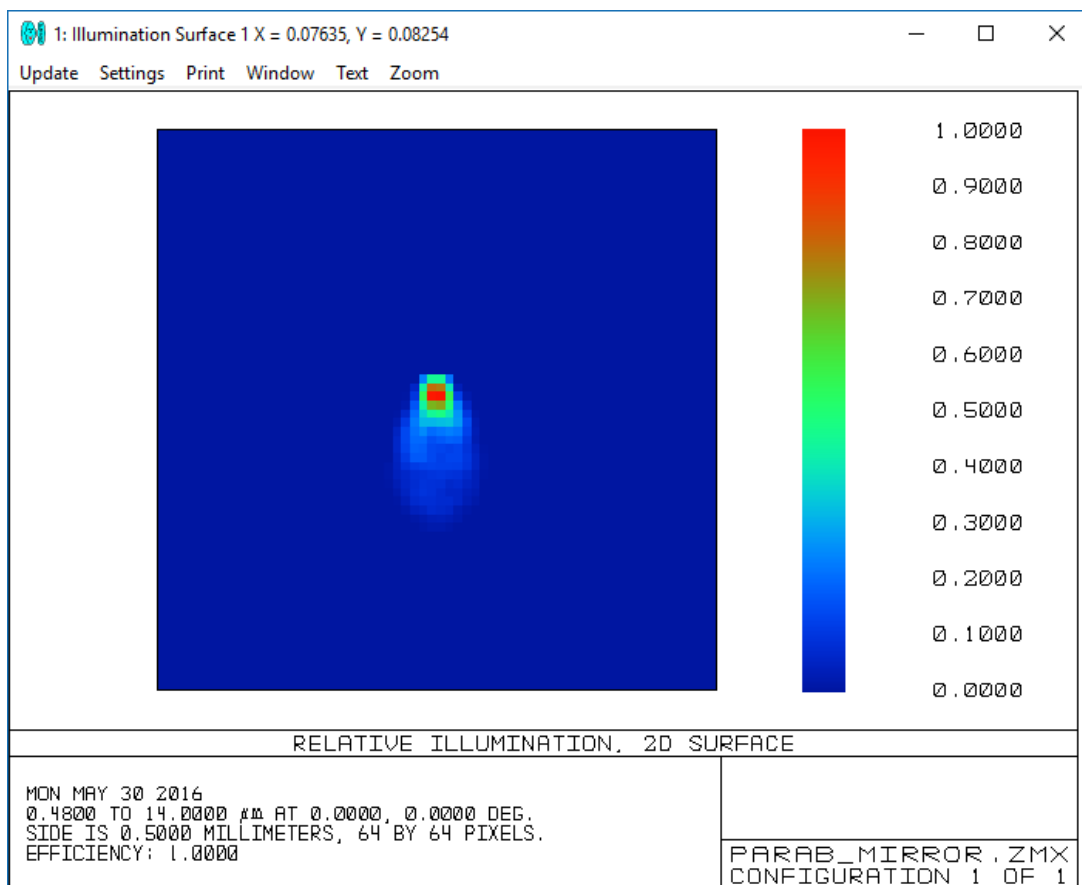


Рис. 3.11. Освітлення від сферичного дзеркала.

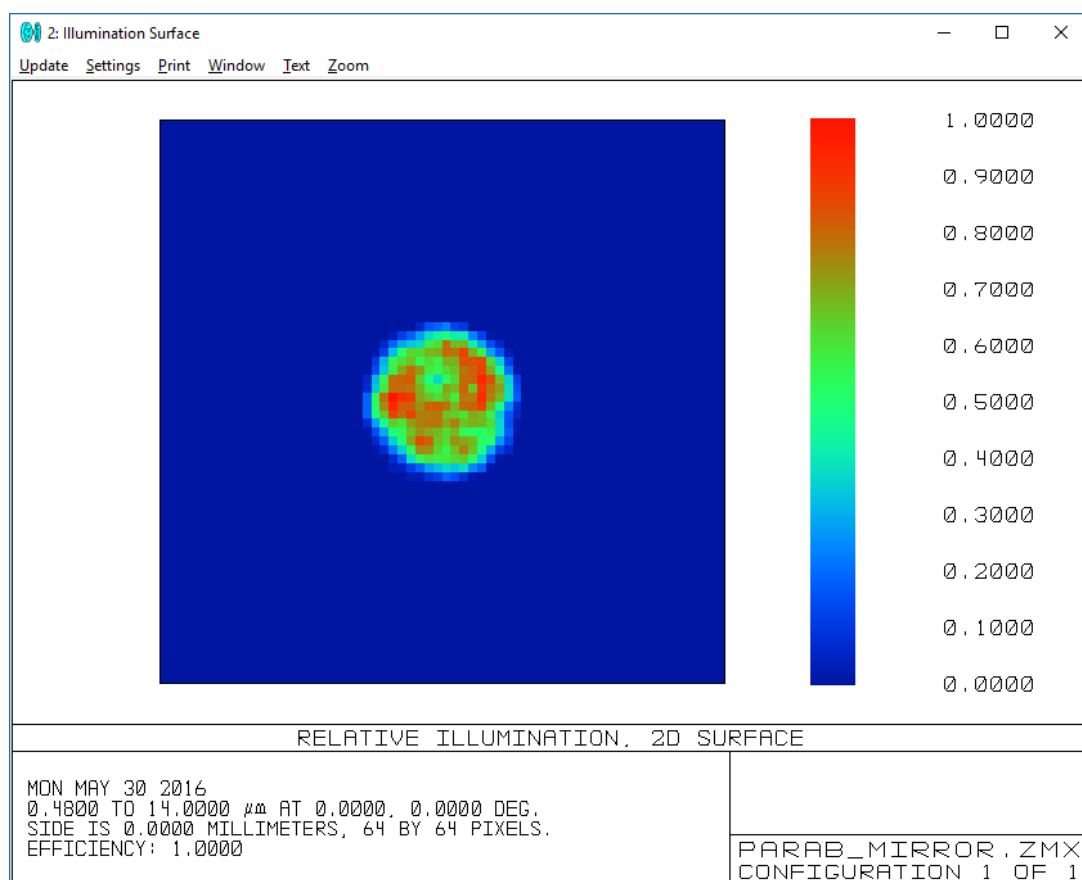


Рис. 3.12. Освітлення від параболічного дзеркала.

Отже, розрахувавши діаграми та графіки сферичного та параболічного дзеркала можна зробити наступний висновок:

- Сферичне дзеркало хоч і простіше у виготовлені, але у нього чітко видно як виявляється аберація кома, яка і виникає внаслідок косого проходження променів через оптичну систему;

- Параболічне дзеркало технологічно складніше виготови, тому і дорожче, але воно в рази краще за сферичне дзеркало, в ньому набагато менше проявляється аберація кома. Відповідно і зображення набагато краще.

Висновки до третього розділу

Ширина щілинної діафрагми в стенді вимірювання МПФ об'єктивів повинна враховуватись для визначення МПФ з допустимою похибкою 5%. Якщо діапазон просторових частот обмежений інтервалом $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$ зберігається нерівність $f(\nu) \leq 1,05$ при розмірах зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} = 0,25 \dots 3 \text{ мкм}$. В діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} \leq 2 \text{ мкм}$.

Для визначення абсолютної похибки вимірювання МПФ об'єктива в наслідок похибки вимірювання ширини щілинної діафрагми треба значення МПФ об'єктива, які відповідають певним просторовим частотам множити на відповідні значення відносної похибки коригуючого коефіцієнта. Ця похибка є нелінійною залежністю від ν для прийнятих в дослідженні розмірах щілинної діафрагми. Але вклад цієї похибки в результат вимірювання МПФ досліджуваного об'єктива є величиною 2-го порядку меншини по відношенню до похибки обумовленої шириною щілини.

Математичне моделювання показало наступне:

- існують певні вимоги до пристроїв позиціювання ІЧ об'єктивів в стенді для вимірювання МПФ, що обумовлюють точність вимірювання в межах 5%;
- з зменшенням фокального відрізка об'єктива точність пристроїв позиціювання повинна бути підвищена;
- вимоги до пристроїв позиціювання в разі збільшення фокального відрізка жорсткіші і знаходяться в межах $7 \div 18 \text{ мкм}$;
- вимоги до пристроїв позиціювання в разі зменшення фокального відрізка знаходяться в межах $9 \div 26 \text{ мкм}$.

Математичне моделювання показало, що похибка пристроїв позиціювання для забезпечення похибки вимірювання МПФ в межах 5% повинна не перебільшувати $7 \div 9 \text{ мкм}$.

В якості коліматорного об'єктива в стенді вимірювання МПФ доцільно використовувати параболічний дзеркальний об'єктив. Параболічне дзеркало технологічно складніше виготови, тому і дорожче, але воно в рази краще за сферичне дзеркало, в ньому набагато менше проявляється аберація кома. Відповідно і зображення набагато краще.

Розділ 4. Розробка стартап проекту

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

В загальному розробка стартап-проекту включає себе низку етапів першим з яких є маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає в себе розробку та опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів. При цьому аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації. На базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту

Наступним етапом являтиметься організація стартап-проекту, що включатиме в себе складання календарного план-графіку реалізації стартап-проекту, проводиться розрахунок потреби в основних засобах та нематеріальних активах та визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі.

Четвертим етапом являтиметься фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту, що буде включати в себе визначення обсягу інвестиційних витрат, розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту), визначатиметься рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

На останньому етапі проводиться визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів, складається інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом,

планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів, планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Дані етапи реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту

4.1 Опис ідеї проекту

Метод належить до оптичного приладобудування, зокрема до створення стенду та написання програмного забезпечення, що надає можливість якісної оцінки фактичних характеристик об'єктів. Даний метод буде цікавим в першу чергу всім оптико-електронним компаніям, що займаються створенням об'єктів в першу чергу. Також даний метод зацікавить компанії, які займаються тестами й оглядами сучасних гаджетів, оскільки використання цих методів є більш об'єктивним ніж сучасні підходи.

У таблиці 4.1 представлено морфологічну карту широкого спектра елементарних рішень, тобто альтернативних засобів реалізації кожної функції.

Таблиця 4.1. Морфологічна карта

Основні параметри	Проміжне рішення				
Тип установки	З гармонійним аналізом оптичного сигналу	З гармонійним аналізом електричного сигналу	З неперіодичним тест об'єктом	інше	-
Джерело випромінювання	Лазери	Лампа розжарювання	Галогенна лампа	Глобар	Люмінесцентна лампа
Конденсор	Аббе	Ахроматичний	Апланатичний	Зеркальний	Поворотно відкидний
Світлофільтр	Спектральний	УФ	ІЧ	Поляризаційний	Нейтральний
Окуляр	Рамсдена	Кельнера	Ортоскопічний	Ерфле	Ширококутний
Приймач випромінювання	Електронно-оптичний перетворювач	Фотопомножувач	Матриця (ПЗЗ/КМОН)	Око	інше

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка методу для контролю якості зображення об'єктів	Контроль якості при виготовленні оптичної техніки.	Виготовлення якісної оптичної техніки
	Тестування об'єктів для визначення їхньої якості зображення.	Визначення оптимального продукту для споживача у співвідношенні ціна-якість

Отже, розробка такого методу забезпечить виготовлення високоякісної оптичної техніки, головними напрямками застосування якої є використання в компаніях зі створення оптико-електронної продукції. Також ця ідея дає можливість використання її не тільки на заводах, лабораторіях, науково-дослідних інститутах, а й у торговельних корпораціях

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Арсенал	Фотоприлад	Optokon			
1	Доступність	Можливість використовувати не в лабораторних умовах	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження			✓
2	Точність вимірювання	За стабільних умов висока	Висока	Висока	Висока		✓	
3	Відкритість результатів	Відкриті	Відкриті для обмеженого ряду пристроїв	Закриті	Закриті			✓
4	Універсальність	Дозволяє провести дослідження об'єктів будь-якого оптичного діапазону	Дозволяє провести дослідження об'єктів певного оптичного діапазону	Дозволяє провести дослідження об'єктів будь-якого оптичного діапазону	Дозволяє провести дослідження об'єктів лише ІЧ оптичного діапазону		✓	
5	Простота відображуваних результатів	Відображення графіку МПФ, що наглядно все демонструє	Відображення показників, на основі яких робиться висновок про якість	Перевіряється лише відповідність до заявлених характеристик	Дослідження проводяться лише фахівцем, який у подальшому формує звіт			✓

Отже, головною перевагою та сильною стороною даного проекту для кінцевого користувача є простота для отримання результатів в реальному часі, інтуїтивна зрозумілість отриманих результатів досліджень, а саме головне доступність. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Так як у даному проекті лише сильні та нейтральні сторони, а слабкі – відсутні, його можна вважати конкурентноспроможним.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного розділу буде проведено аудит методу реалізації проекту. Це передбачає аналіз таких складових, як доступність технології, наявність технології та її опис.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення портативного стенду для оцінки якості зображення об'єктивів, що не потребує лабораторних умов	З механічним скануванням в площині зображення	Існуюча технологія	Недоступна
2		З використанням мікроболометричних матриць в площині зображення	Існуюча технологія	Доступна
3		З використанням ЛПЗЗ приймачів в площині зображення	Метод існує, для даної технології не застосовується	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: «З використанням ЛПЗЗ приймача в ПЗ»				

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що наш проект, а саме «метод для контролю якості зображення об'єктивів» можливо технічно реалізувати, і, з удосконаленням. Оскільки даний метод дозволяє надати результати за мінімальної кількості проведених обчислень з найменшою похибкою при вимірюванні, а також відносно простий в реалізації, із таблиці 5.3 обрано пункт 3.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

У даному підрозділі визначаються ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту. Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап- проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500 тис. ум. од. (станом на 2017р.)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стангує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція Час на отримання ліцензії
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандарту ISO13322
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, чи є ринок привабливим для входження. На сьогоднішній день ринок розділений між трьома основними гравцями: Арсенал, Фотоприлад, Optokon, та стангує. Коефіцієнт рентабельності не є високим, але ринок є перспективним, оскільки потребує нових розробок доступних для кінцевого користувача. Через помірну конкуренцію є невеликі обмеження для виходу на ринок, та у майбутньому, з розвитком проекту, їх можна буде розвинути та реалізувати.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл.4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Необхідність якісного, точного та інтуїтивно зрозумілого аналізу якості зображення об'єктивів	Компанії оптико-електронних приладів та спеціалізовані торгові компанії	Відмінність в допустимих похибках, які дозволено в обробці інформації	Вільний доступ Висока точність Доступність Простота в експлуатації

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що найбільшою цільовою аудиторією є компанії з виготовлення оптико-електронних приладів, у яких і застосовується дана методика. Варто також відзначити, що головною потребою є якісна характеристика об'єктивів, що дозволяє подати результати досліджень у доступній формі та у реальному часі.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 4.6 Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Швидкий розвиток сучасних технологій в сфері оптико-електронних приладів	Динаміка продажу об'єктивів на сьогоднішній день спадає	Проведення рекламної кампанії, що акцентує увагу на важливості якості об'єктивів (співпраця з виробниками)
2	Відсутність якісної оцінки усіх продуктів лінійки (лише преміальні)	Популярністю все більше користуються преміальні моделі, детальний аналіз яких наявний	Акцентування уваги на якісних та водночас бюджетних об'єктивах

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що даний сегмент на ринку являється не насиченим, в результаті чого, зацікавленість користувачів в даній технології низька. Відповідно, динаміка продажу об'єктивів на сьогоднішній день спадає. А також, більшість споживачів надають перевагу відомим преміальним моделям, для яких уже наявний детальний аналіз.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (табл. 4.7).

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Вихід на ринок принципово нових систем, що значною мірою відрізняються в якості	Збільшення обсягів продаж за рахунок просування новітніх технологій.	Прискорення виробництва стендів та продажу ліцензій
2	Потреба у зміні пристрою, через сповільнення його роботи в результаті тривалої експлуатації	Збільшення обсягів продаж через пряму потребу споживача.	Співпраця з споживачами після років експлуатації

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що головним фактором, що сприяє поліпшенню становища даного сегменту на ринку є поява нових технологій в сфері оптико-електронного приладобудування, а також продовження у співпраці при прямій потребі споживачів.

Наступним кроком необхідно провести ступеневий аналіз конкуренції на ринку, що наведено в таблиці 4.8. Даний аналіз розкриває вид ринкової конкуренції та допомагає у виборі стратегії поведінки на ринку.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Конкуренція : монополістична	На ринку представлено дві компанії, одна з яких являється виробником обладнання для тестування об'єктів, інша виступає в ролі незалежного експерту у оцінці якості	Розробка власного обладнання із використанням методу описаного у роботі
2. За рівнем конкурентної боротьби : глобальна	Результати роботи експертної компанії доступні у всьому світі, та охоплюють результати тестування переважної більшості об'єктів	Здійснювати перевірку значно більшої кількості об'єктів, та надавати їх порівняльну характеристику

3. За галузевою ознакою : внутрішньогалузева	Ринок об'єктів	Розширювати можливості системи, створення бази отриманих результатів
4. Конкуренція за видами товарів: між бажаннями	Спостерігається конкуренція між виробниками об'єктів, що співпрацюють з компанією експертом	Надання незалежних оцінок
5. За характером конкурентних переваг : нецінова	Надання користувачам можливості самостійної оцінки будь-яких пристроїв	Розширення мережі встановлення стендів
6. За інтенсивністю марочна	Велику роль відіграє репутація компанії	Збільшення обсягів реклами

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, ступеневий аналіз конкуренції на ринку демонструє те, що існують три компанії, що використовують схожі методи і зайняли ринок збуту. Проте, на ринку не велика кількість конкурентів, оскільки ринок можна вважати специфічним. При цьому існуючі компанії, або надають інформацію лише про певні об'єкти, або подана ними інформація являється у формі не зрозумілій пересічному користувачу.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.9).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу:		Висновки
Прямі конкуренти в галузі	Арсенал, Фотоприлад Optikon	Ринок є насиченим, проте конкуренція не висока, оскільки відкритою залишається потреба аналізу більшого об'єму продукції
Потенційні конкуренти	Час на отримання ліцензії Міжнародний ринок	Можливість входу на ринок існує за наявності дозволів і сертифікатів використання та патентів
Постачальники	Відомість, велика вартість	Постачальники не диктують умови на ринку
Клієнти	Якісне виконання поставленого завдання Невелика ціна	Клієнти орієнтуються не лише на цінову пропозицію, а й на наявність пристрою в торговій мережі
Товари-замінники	На сьогодні відсутні	На сьогодні відсутні

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що хоч на ринку України аналогічна продукція представлена, проте конкуренція не є великою.

Проте при входженні на міжнародний рівень необхідно враховувати те, що компанії є відомими та конкурентоспроможними, і потрібно конкурувати на ринку за допомогою якості та можливостей приладу.

На основі аналізу конкуренції, (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Головними чинниками продукту є не завищена ціна, автоматизованість приладу, простота в експлуатації та підвищені можливості в швидкості обробки даних з використанням меншої кількості енергії.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Вартість	Не завищена, конкурентна ціна
2	Доступність та універсальність	Пропонований пристрій дозволяє проводити тестування об'єктів безпосередньо кінцевим користувачем, що збільшує кількість протестованих об'єктів, та збирає усі статистичні дані до єдиної бази
3	Простота	Відображення оціночних характеристик у зрозумілій цифровій формі.
4	Підтримка продукції	Технічна підтримка продукту, можливість ремонту та обслуговування
5	Довіра споживачів	Рейтинг компанії

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що даний проект має право на життя. На сьогодні, пристрій з такими можливостями є затребуваним. Окрім цього, не завищена вартість може скласти конкуренцію відомим компаніям. Цей проект повинен конкурувати за факторами ціни та собівартості, тобто ціна та собівартість повинні бути меншими в порівнянні з рівнем ціни та собівартістю у конкурентів, простим в експлуатації, тобто не потребувати високого рівня знань у споживачів, а також, повинен бути простим в технічному обслуговуванні.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін
«Метод контролю якості зображення об'єктивів»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з OPTIKON						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність	15							✓
2	Програмна частина	12				✓			
3	Репутація	10		✓					
4	Доступність	15							✓
5	Універсальність	18				✓			

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту «Метод контролю якості зображення об'єктивів» в порівнянні з аналогом головного конкурента OPTIKON продемонстрував, що головною сильною стороною проекту є точність та доступність. Ергономічність, простота в експлуатації та технічна підтримка приблизно однакова між спроектованим приладом та аналогом конкурентів.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: доступність, простота відображення результатів, відкритість результатів	Слабкі сторони: Низька репутація підприємства. Невідома у світовій спільноті, не визнана торгова марка.
Можливості: Реальне відображення якості бюджетних об'єктивів За рахунок вдосконалення, створення найякіснішого продукту на ринку Поява міжнародних інвесторів, зацікавлених у подальшому розвитку проекту	Загрози: Спадаюча динаміка продажу об'єктивів Новий метод, ще не сильно набувший популярності у світі, вчасності і в Україні.

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що сильні і слабкі сторони проекту, а також можливості та загрози, пов'язані з реалізацією проекту в цілому. Сильною стороною проекту є вартість доступність, його простота в експлуатації. Слабкою – необхідність в подальших дослідженнях та те, що продукт не є відомим, тим самим підвищуючи необхідне інвестування для старту проекту. Можливості і загрози, наведені в таблиці є вірогідними результатами впливу факторів, які могли б статися. Використання більш популярної і менш вартісної на сьогодні технології є фактором загрози, але вільне входження на ринок без достатньої кількості конкурентів – можливістю.

Далі базуючись на SWOT-аналізі розробляємо альтернативи ринкової поведінки.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап- проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Створення першого прототипу пристрою	Швидке отримання ресурсів, через зацікавлення з боку виробників 50%	2-3 місяці
2	Стратегія виходу з ринку	20%	2-3 роки
3	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу	70%	1-2 роки

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що було розроблено альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту, а саме комплекс заходів поведінки на ринкові і строки на їх реалізацію. Основною стратегією є створення прототипу, яке з інвестиціями можливо реалізувати вже за 2-3 місяці. Окрім цього можна вибрати стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу, що має більший строк реалізації, але й отримання вигоди збільшиться до 70%.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

У даному підрозділі розглянуто розроблення ринкової стратегії проекту, а саме визначення стратегії ринку та опис цільових груп потенційних споживачів. Далі визначимо визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Оптико-електронні компанії	Висока	Середній	Низька	Висока
2	Спеціалізовані торгові компанії	Середня	Середній	Низька	Середня
Які цільові групи обрано: Оптико-електронні компанії					

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що за результатами аналізу потенційних груп споживачів обрано стратегію концентрованого маркетингу для цільової групи: оптико-електронні компанії та спеціалізовані торгові компанії. Всім цим цільовим групам необхідні переваги, які є в даному проекті.

Для роботи в даному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Створення лабораторії для аналізу якості об'єктива, що базується на даній технології	Адаптація до ринку	Співпраця із виробниками бюджетних об'єктивів	Стратегія диференціації

Отже, проаналізувавши таблицю, було вирішено, що потреби у них співпадають, тому розробляти для кожного сегмента програми ринкового впливу не буде доцільним. У зв'язку з цим було прийняте рішення обрати за стратегію охоплення ринку стратегію адаптації до ринку, яка пропонує всім сегментам прилад зі стандартизованими параметрами та характеристиками. За базову стратегію розвитку проекту було обрано стратегію диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.4.16).

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект першопрохідцем на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні, оскільки у конкурентів реалізовані подібні системи	Співіснувати на неконкурентних засадах	Ні. Буде покращення існуючих прототипів.	Стратегія позиціювання

Отже, проаналізувавши таблицю, базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано стратегію позиціювання, оскільки вона є найбільш доцільною. Компанія показує чим продукт унікальний, чим відрізняється від конкурентів, чим корисний споживачу, а саме відбувається позиціювання на особливостях технології, що є важливим для споживачів. Також, з таблиці видно, що товар не є "першопрохідцем", але компанія не буде копіювати деякі основні характеристики товарів у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію наслідування лідера яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект (табл. 4.17)

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість	Стратегія спеціалізації	Точність	Точність, швидкість, якість
2	Доступність	Стратегія диференціації	Незалежність від лабораторних умов	Легкість, простота у використанні, простота у проведенні вимірювань
3	Простота	Стратегія спеціалізації	Виведення інформації у зрозумілій формі	Простота у проведенні вимірювань, проста інтерпретація результатів

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Метою даного підрозділу є розробка маркетингової програми стартап-проекту, що включає в себе план заходів із ознайомлення цільової аудиторії з ідеєю проекту, просування його на ринок для підвищення зацікавленості та прихильності потенційних споживачів. Першим кроком в розробці маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність	Високу стабільну точність при порівнянні об'єктів за ідентичних умов	Забезпечує конкурентоспроможну точність
2	Універсальність	Дозволяє працювати з будь-якими об'єктами	Дозволяє перевіряти об'єкти, що працюють в різних спектральних діапазонах

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що вигідними характеристиками товару являються точність та універсальність, що надають перевагу даному пристрою на ринку.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	
I.Товар за задумом	Прилад проводить оцінку модуляційної передавальної функції об'єктів з різним спектральним діапазоном	
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	
	1. Тест міра	0,8х1м
	2. ПЗ	Android та ios сумісне
	3. Фокусна відстань	20 мм
	4. Роздільна здатність	10 лін/мм
	Відповідно до ISO13322	
	Пакування тубус	
	Марка: «OBtest»	
III. Товар із підкріпленням	До продажу навчальні відео	
	Після продажу підтримка, та порівняння отриманих результатів у єдиній базі	
Товар буде захищений за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці		

Отже, проаналізувавши таблицю, можна дійти висновку, що основний задум даного стартап-проекту полягає у створенні універсального методу для дослідження об'єктів з різним спектральним діапазоном. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні, крім того у комплекті будуть входити навчальні посібники. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	15000	Відсутні	10000	1000

Отже, проаналізувавши таблицю, було визначено межі, в яких після детального аналізу можна встановити ціну на товар, що знаходиться в розробці. Оскільки цільовими групами є не фізичні особи, а компанії, їх доходи оцінюються високо. Враховуючи відсутність аналогів ціну на товар можна поставити у межах 1000.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	В даному сегменті закупівля відбувається напряму з виробником	Пошук потенційних клієнтів Аналіз ринку потреб Реклама	Канал нульового рівня	Тендерні торги, через мережу Інтернет

Отже, оскільки ринок збуту, що обслуговується вузький, використовуємо прямий канал збуту. Популяризації власної продукції сприятиме проведення маркетингових кампанії, що базуватимуться на проведенні оглядів популярних моделей об'єктів, для зацікавлення користувача. Також необхідно мати власний сайт, метою якого буде: популяризація продукту, демонстрація роботи з системою, та роз'яснення отриманих числових значень.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цілових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цілові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Зацікавленні клієнти, що завжди у пошуках нових технологій, відвідують виставки, дізнаються в інтернеті, тощо	Міжнародні виставки, мережа інтернет (спеціалізовані сайти або форуми)	Участь в усіх можливих тематичних виставках, направлений інтернет-маркетинг	Представлення товару, його позиціонування з метою залучення та зацікавлення клієнтів	«Якість понад усе»

Отже, проаналізувавши таблицю, можна зробити висновок, що концепція маркетингових комунікацій показала, для того щоб популяризувати власну продукцію необхідно, показувати продукцію на виставках, публікувати дослідницькі статті, тобто показувати свою активну розробницьку наукову діяльність по різних джерелах. Завданням рекламного повідомлення має стати представлення товару відповідній аудиторії (підприємств).

Висновки до четвертого до розділу

За результатами проведеного аналізу реалізації ідеї стартап-проекту з розробки методу дослідження фактичних показників якості зображення об'єктивів можна зробити загальні висновки.

Попит на продукцію (метод) великий, адже хоча ринок продажу об'єктивів спадає, проте вибагливих до об'єктивів користувачів досить багато. Існуючий на сьогоднішній день аналіз об'єктивів охоплює не великий сегмент серед усіх пристроїв, що спонукає компанії до проведення суб'єктивної оцінки якості об'єктивів більш бюджетних варіантів. Пропонований метод спрямований на задоволення потреб кінцевих користувачів, у плані контролю якості обраного об'єктиву.

Конкуренція на світовому ринку присутня, проте вони займають певний сегмент ринку, а саме компанія OPTIKON публікує дослідження лише визначених моделей об'єктивів, компанія Фотоприлад яка випускає дороговартісне обладнання для контролю якості та програмне забезпечення до нього (використання даного методу передбачає значні фінансові затрати та знання у фаховій області), компанія Арсенал проводить лише стандартизацію виробів на замовлення виробників.

Головною перевагою на ринку є універсальність та доступність методу, що дозволить якісно оцінити будь-який пристрій. Саме тому питання конкуренції й не являється першочерговим.

В якості альтернативи пропонується створити власну лабораторію із стендом, та проводити огляди об'єктивів, що цікавлять користувачів.

Підсумовуючи вищесказане, вважаю подальшу імплементацію доцільною.

ВИСНОВОК

Вибір тієї чи іншої характеристики якості зображення об'єктива залежить від його призначення. Універсальною і найбільш інформативною характеристикою якості зображення об'єктивів є оптична передавальна функція та її складові: модуляційна передавальна функція та фазова передавальна функція.

Для кількісної оцінки якості зображення варто користуватись числовими критеріями, що отримані на основі цих характеристик:

- радіус кола розсіювання;
- максимальна роздільна здатність;
- критерій перепаду;
- число Штреля;
- коефіцієнт передачі модуляції при певній просторовій частоті.

Для визначення характеристик якості зображення можуть використовуватись стенди побудовані на наступних принципах:

- з механічним скануванням зображення одноелементним фотоприймачем;
- з використанням ЛППЗ;
- з використанням матричних приймачів.

Недолік першої схеми полягає в необхідності розробки високоточного механічного приводу для пересування фотоприймача і неможливості отримання результату в реальному масштабі часу. Це особливо важливо коли контроль якості зображення проводиться під час юстування об'єктива.

ЛППЗ використовується для контролю якості зображення об'єктивів що працюють в видимому діапазоні спектра. Проведене комп'ютерне моделювання дозволило отримати результати, що дозволяють визначити необхідне значення збільшення мікрооб'єктиву β у вузлі фотометрирування стенду вимірювання МПФ, а також визначити припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дають можливість зменшити похибку вимірювання МПФ до 5%. Припустимі рівні обмеження вихідного сигналу, що дозволяють зменшити похибку

визначення МПФ, не повинні перевищувати 0,01 максимального нормованого значення ФРЛ, позаяк надалі похибка визначення МПФ починає суттєво зростати.

Для контролю якості зображення ІЧ об'єктивів замість еталонного мікрооб'єктива, який складно виготовити в цьому спектральному діапазоні, краще скористатися або поворотом зображення щілинної діафрагми відносно вертикалі або методом мікросканування. Необхідне значення кута повороту або кроків мікросканування визначають в залежності від розмірів пікселя матричного приймача і допустимої похибки вимірювань.

Ширина щілинної діафрагми в стенді вимірювання МПФ об'єктивів повинна визначатись, щоб отримати МПФ з похибкою 5%. Якщо діапазон просторових частот обмежений інтервалом $\nu = 0 \dots 50 \text{ мм}^{-1}$ зберігається нерівність $f(\nu) \leq 1,05$ при розмірах зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} < 0,25 \dots 3 \text{ мкм}$. В діапазоні просторових частот $\nu = 0 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$ ця нерівність виконується тільки при ширині зображення щілинної діафрагми $b_{\text{зобр}} \leq 2 \text{ мкм}$.

Похибка вимірювання ширини щілинної діафрагми є величиною 2-го порядку меншини по відношенню до похибки обумовленої безпосередньо шириною щілини.

Математичне моделювання показало, що похибка пристроїв позиціонування для забезпечення похибки вимірювання МПФ в межах 5% повинна не перебільшувати $7 \div 9 \text{ мкм}$.

В якості коліматорного об'єктива в стенді вимірювання МПФ доцільно використовувати параболічний дзеркальний об'єктив. Параболічне дзеркало технологічно складніше виготови, тому і дорожче, але воно в рази краще за сферичне дзеркало, в ньому набагато менше проявляється аберація кома. Відповідно і зображення набагато краще.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочник технолога: справочник / под общ. ред. Кузнецова С.М. и М.А.Окатова - Л.: Машиностроение, 1983 - 414 с
2. Вычислительная оптика: справочник / под ред. Русинова М.М., Грамматина А.П. и др. - 2-е изд. - Л.: Машиностроение, 2008 - 423 с
3. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. Теория, основы проектирования, оптические характеристики. - М.: Искусство, 1978 - 543 с
4. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения: Учебник для вузов / под ред. проф. Д.Т. Пуряева. - М.: Машиностроение, 1987 - 264 с.
5. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000 - 167 с
6. Кирилловский В.К. Методы исследования и контроля качества оптических систем: Учебное пособие. - СПб: НИУ ИТМО, 2012 - 125 с
7. Проектирование оптических систем. Пер. с англ./под ред. Р.Шеннона и Дж. Вайанта. М.:Мир, 1983, 430 с
8. Максutow Д.Д. Изготовления и исследование астрономической оптики. 2-е изд. М.: Наука, 1984, 272 с
9. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
10. Креопалова, Г.В.; Пуряев, Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978, 224 с
11. Кучеренко О.К. Юстування та випробування оптичних приладів: Конспект лекцій./О.К.Кучеренко -К.: ІВЦ «Політехніка», 2012.-112 з.:іл.
12. Метод вимірювання подуляційної передавальної функції камери з матричним приймачем випромінювання/ В. Г. Колобродов, О. М. Явдошак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2015, – с.58-61.

13. Кучеренко О.К. Пат. 33371 А Україна, МПК G01M 11/02. Пристрій для контролю якості об'єктива / О.К.Кучеренко. С.В. Вдовіченко. - № ; Заявл. 26.12.2007; Опубл. 26.06.2008; Бюл. - №12. – 4с.
14. Кучеренко О.К. Пат. 40864 А Україна МПК G01M 11/02. Пристрій для контролю якості об'єктива / О.К. Кучеренко; С.В. Вдовиченко; - № и 200813984; Заявл. 04.12.2008, Опубл. 27.04.2009; Бюл. № 8 – 4с.
15. Колобродов В.Г. Дифракційна теорія оптичних систем / В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
16. Кучеренко О.К. та ін. Визначення параметрів вузла фотометрування в стенді вимірювання опф об'єктивів // Вісник НТУУ “КПІ”. – 2003. – № 26. – С. 5–11.
17. Кучеренко О.К. та ін. Точність визначення МПФ об'єктивів фотоприймальним пристроєм з ЛППЗ // Вісник НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 31. – С. 31–38.
18. Кучеренко О. К. Контроль качества сборки и юстировки объективов тепловизионных систем. / О.К.Кучеренко И.А.Медведь // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 2012. - № 1 - С.26 -30
19. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем /М.Я. Шульман – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 224с.
20. Патент 116386 Укр, МПК G02B 9/12. Інфрачервоний світлосильний трилінзовий об'єктив / Банделюк О. В., Гусев А. Ю., Колобродов В. Г. - № и 201606546 ; Заявл. 15.06.2016; Опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.
21. Патент 118054 Укр, МПК G02B 13/14 Інфрачервоний об'єктив з термостабілізованою якістю зображення / Муравйов О. В., Романюк Т. А.- № и 201613027 ; Заявл. 20.12.2016; Опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
22. Патент 108282 Укр, МПК G02B 9/14. Трилінзовий атермальний світлосильний об'єктив для інфрачервоного діапазону спектру / Тягур В. М., Лихоліт М. І., Варьонова Г. Л. - № и 201308394 ; Заявл. 04.07.2013 ; Опубл. 12.01.2015, Бюл. № 11.

- 23.Справочник конструктора оптического-механических приборов / М.Я. Кругер;
под ред. М.Я. Кругера, В.А. Панова. Л., "Машиностроение", 1988, 760 с.
- 24.ISO – 12233